



TITLE:

マスコンクリート構造物における
水和熱によるひびわれ防止方法に
関する基礎的研究(Dissertation_全
文)

AUTHOR(S):

吉岡, 保彦

CITATION:

吉岡, 保彦. マスコンクリート構造物における水和熱によるひびわれ防
止方法に関する基礎的研究. 京都大学, 1986, 工学博士

ISSUE DATE:

1986-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5880>

RIGHT:

マスコンクリート構造物における
水和熱による
ひびわれ防止方法に関する
基礎的研究

昭和60年11月

吉岡保彦

マスコンクリート構造物における
水和熱による
ひびわれ防止方法に関する
基礎的研究

昭和60年11月

吉 岡 保 彦

目 次

第1章 緒 論	1
1. 1 序論	1
1. 2 本論文の概要	4
第2章 マスコンクリートにおける熱応力に関する既往の研究	
2. 1 マスコンクリートにおける熱応力の計算方法	6
2. 1. 1 はじめに	6
2. 1. 2 内部拘束応力計算法	6
2. 1. 3 外部拘束応力計算法	8
2. 2 解析上の特性値とひびわれ発生条件	14
2. 2. 1 拘束度	14
2. 2. 2 ヤング係数およびクリープ	16
2. 2. 3 圧縮強度	20
2. 2. 4 引張強度	21
2. 2. 5 ひびわれ発生条件の評価	22
2. 3 ひびわれ防止、制御対策	23
2. 3. 1 はじめに	23
2. 3. 2 温度上昇低減のための方策および温度管理	23
2. 3. 3 拘束度の緩和	24
2. 3. 4 目地や鉄筋によるひびわれ幅制御	24
参考文献	25
第3章 マスコンクリートの熱応力に及ぼす拘束度に関する 解析的研究	33
3. 1 研究目的	33
3. 2 半無限地盤上のマスコンクリートブロックの拘束度 に関する研究	34
3. 2. 1 ヤング係数比の影響に関する検討	34
3. 2. 2 高さ、長さ比 (h/l) の影響に関する検討	35
3. 3 同幅の拘束体上に打設されたブロックの拘束度に関する研究	37
3. 4 結語	39
参考文献	41
第4章 熱応力・ひびわれ発生に及ぼすコンクリートの 力学的性質とその影響に関する研究	51
4. 1 研究目的	51

4.2	マスコンクリート躯体の力学的性質に関する研究	52
4.2.1	実験概要	52
4.2.2	実験計画および方法	52
4.2.3	結果および考察	53
4.3	マスコンクリートにおけるクリープに関する研究	56
4.3.1	実験概要	56
4.3.2	実験方法	56
4.3.3	実験結果と考察	57
4.4	結語	60
	参考文献	62
第5章 単純拘束モデルによるマスコンクリートの熱応力		
	評価方法に関する研究	75
5.1	研究目的	75
5.2	応力発生メカニズムのモデル化とその解法	76
5.2.1	外部拘束に対するモデル化と解析の基本	76
5.2.2	外部拘束, 内部拘束を受ける場合の解析モデルと解法	77
5.3	材料定数の取扱いとシステムの構成	84
5.3.1	概要	84
5.3.2	クリープ係数の算定法	84
5.3.3	ヤング率の算定法	85
5.3.4	ひびわれ発生の判定基準	85
5.3.5	システムの構成	86
5.4	結語	87
	参考文献	88
第6章 マスコンクリートにおける熱応力に及ぼす外部および内部拘束の影響に関する研究		
	拘束の影響に関する研究	95
6.1	研究目的	95
6.2	外部拘束応力に関する実験的研究	96
6.2.1	実験概要	96
6.2.2	測定原理および装置	96
6.2.3	実験結果および考察	97
6.3	内部拘束に関する実験的研究	101
6.3.1	実験概要	101
6.3.2	測定装置	101
6.3.3	実験結果および考察	103
6.4	結語	106
	参考文献	108

第7章	クリープによる応力緩和およびひびわれ発生の 確率論による評価に関する研究	1 2 1
7. 1	研究目的	1 2 1
7. 2	クリープによる応力緩和に関する研究	1 2 2
7. 2. 1	概要	1 2 2
7. 2. 2	解析モデルおよび解析条件	1 2 2
7. 2. 3	解析結果とこれに対する考察	1 2 3
7. 3	マスコンクリートにおけるリラクセーション関数に 関する検討	1 2 6
7. 3. 1	概要	1 2 6
7. 3. 2	マスコンクリートにおけるクリープ関数	1 2 6
7. 3. 3	解析方法	1 2 8
7. 3. 4	解析結果および考察	1 2 8
7. 4	ひびわれ発生の確率的評価	1 3 0
7. 4. 1	概要	1 3 0
7. 4. 2	検討方法	1 3 1
7. 4. 3	検討結果および考察	1 3 1
7. 5	結語	1 3 3
	参考文献	1 3 5
第8章	大規模コンクリート格納施設におけるひびわれ 防止方法に関する研究	1 4 7
8. 1	研究目的	1 4 7
8. 2	中庸熱フライアッシュセメントおよび流動化剤 を使用したコンクリートに関する研究	1 4 8
8. 2. 1	実験概要	1 4 8
8. 2. 2	使用材料および配合	1 4 8
8. 2. 3	実験方法	1 4 9
8. 2. 4	試験結果および考察	1 4 9
8. 3	熱応力シミュレーション解析によるひびわれ 防止対策の研究	1 5 2
8. 3. 1	底盤における検討	1 5 2
8. 3. 2	円筒壁における検討	1 5 5
8. 4	結語	1 5 9
	参考文献	1 6 0
第9章	ダムのポンプ圧送施工法における ひびわれ防止方法に関する研究	1 7 5
9. 1	研究目的	1 7 5
9. 2	P C D工法におけるひびわれ防止対策に関する研究	1 7 6

9.2.1	解析方法	176
9.2.2	解析結果および考察	176
9.3	フライアッシュ混入高炉セメントおよび流動化剤を 用いた貧配合コンクリートの特性に関する研究	178
9.3.1	実験概要	178
9.3.2	材料・配合および試験方法	178
9.3.4	試験結果および考察	179
9.4	貧配合コンクリートにおける流動化剤の ポンプ圧送性改善効果に関する研究	182
9.4.1	実験概要	182
9.4.2	使用材料および配合	182
9.4.3	コンクリートポンプおよび配管	182
9.4.4	実験方法	183
9.4.5	実験結果および考察	183
9.5	結語	186
	参考文献	188
第10章	結論および謝辞	201

第1章 緒 論

1. 1 序論

コンクリートは、強度、耐久性、造形性、経済性に優れた材料であることから、鉄とともに建設分野における基幹材料として用いられ、近年における飛躍的な社会資本の充実に大きな役割を果たしてきた。

セメントの生産高は、昭和30年に1000万トンにも満たなかったものが、昭和54年には9300万トンにも達している。このような急激な伸びの中には一般の建築、道路、ダム、トンネル、橋梁等の他、LNGタンク、原子力発電所、に代表されるエネルギー関連施設、上下水道施設、石油掘削人工島や大規模橋りょう基礎のような海洋、港湾構造物など新しい分野へのコンクリートの利用が含まれている。

この背景には、材料開発、構造解析・設計技術、材料の評価・管理技術、製造技術、および施工技術における著しい発展があり、数多くの技術的課題の克服が地道に着実に進められてきたことがある。

例えば、材料開発として、AE剤、高性能減水剤を含む表面活性剤などの混和剤、スラグや繊維補強材などの混和材、耐硫酸塩セメントや膨脹セメントなどの各種セメントなどが挙げられる。

製造技術としては、セメント製造法の効率化を始めとして、プレキャスト部材製造法、自動バッチャープラントの普及、連続練りミキサーなど目覚ましい発展があった。また、施工技術でも、ポンプ工法、大型型枠やスリップフォーム工法などの合理化工法、揚重・運搬機械の大型化など目を見張る変化がみられた。

一方、最近コンクリートの品質に関わる問題が社会的に大きな注目を浴び、新たな技術的課題の解決が要請されている。すなわち、ひびわれの存在、塩分やかぶり不足による鉄筋の腐食、反応性骨材による損傷などの、構造用材としての鉄筋コンクリートの根幹をあやしくする恐れのあることの問題が提起されている。

この原因は、直接的には骨材資源の枯渇や大量・急速施工のひずみからくるものであると云えるが、安定成長期を迎えた現在、築き上げた資産を耐久材として、長期に有効に使用したいとする社会的要請が高まってきている事が、間接的に関係している。

塩害やアルカリ骨材反応の問題は、研究の緒についたばかりであるが、メカニズムの解明や被害防止方法の研究が盛んに進められており、行政的施策の実施とともに、現在の状況は少くとも改善の方向に向かうものと思われる。

コンクリートの欠点の一つに、引張強度が小さく、ひびわれが生じやすいことがある。鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート構造として、この

弱点を補う合理的な方法が採られている。外力に対しては、限界状態設計法にみられるように、設計段階からひびわれを予知し、これを制御することがかなりの精度で可能であるが、施工段階、あるいは環境条件のような比較的不確定な要因から生じるひびわれに対しては、まだ十分な予知・制御手段を有していない現状にある。

このようなひびわれの代表的なものとして乾燥収縮ひびわれ、およびマスコンクリート構造物に見られる熱応力によるひびわれがある。

後者のひびわれは、次の2つの観点から特に注目されている。1つは、コンクリート構造物に対して、水密性や気密性などの高度な機能が期待されることからくるものである。他の1つは、部材の大型化や高強度の要請、および骨材品質の悪化やポンプ施工に伴うセメント量の増加によって、部材内部における発熱量が明らかに増す傾向にあることである。

マスコンクリートの研究の歴史は、概ね1940年代における米国の近代的ダム建設に伴う諸研究から始まる第1期と、1960年頃から現在に到る第2期に分けることができる。

第1期においては、マスコンクリートの代表例としてダムの施工が機械化によって、大規模に行われたことから、ひびわれ防止のための低発熱セメントの開発、クーリングやリフト分割による対策の研究、および発生する熱や応力の基本的な研究が精力的に行われた。この期に確立された技術は、今日も踏襲され、幅広く応用されている。

これに対し、第2期においては、上に述べたようにコンクリートの量と使用される分野が拡大され、ダム以外の大規模、高機能構造物にも適用され始め、短期にしかも大量の施工を行う必要があることから、マスコンクリートのひびわれの問題が生じ、新たに研究が盛んに行われた。

第2期の研究の特徴として、コンピュータの急激な進歩による解析手段と、能力の格段の発達を挙げることができる。特に、温度解析は容易に行えるようになり、材料定数の設定が適当であればマスコンクリートに生じる温度履歴は実用上十分な精度で速く予測することが可能となった。また、有限要素法を始めとした解析手段はマスコンクリートにも適用され、応力予測における精度の向上とメカニズムの解明に有力な武器となっている。

しかしながら、現在、ひびわれが減少する段階に到っているとは云えない状況にある。この理由の1つは、硬化過程における材料特性の複雑な変化が十分には解明されていないことがある。この他に、合理的なひびわれ予測方法が確立されていないこと、マスコンクリートに適した材料開発や防止手段が十分でないことを指摘することができる。特に、マスコンクリートの対策の検討は、施工計画段階で、施工者が行うのが一般であるが、現在の仕方書や指針には対策が定性的に示されているにすぎず、現業の技術者でも行いうる対策の具体化のための定量的な評価方法がなかったことが、大きな要因であると考えられる。

本論文は、このような背景を鑑み、マスコンクリートのひびわれに関する基礎的な研究を行ったもので、マスコンクリートの挙動をできるだけ忠実に表現した、しかも簡易なひびわれ予測方法を提案し、これを応用したひびわれ防止の具体例について述べるものである。

1. 2 本論文の概要

本論文は、マスコンクリートにセメントの水和過程で発生する熱が蓄積、放散されることによって生じる熱応力と、これが原因となって起こるひびわれの問題に関して論じたものである。構成は、合計10章から成っている。

第2章においては、本論文の主題であるマスコンクリートのひびわれ問題に関連する既往の研究を総括し、現状で明らかになっている点と、未解明の課題を抽出することを行う。まず、今までに提案された主要な応力推定方法を概説すると共に、これらの特徴、基本的考え方を明確にする。次に、これらの推定方法に用いられる特性値に関連する拘束度、ヤング係数、クリープ、温度変化量などについて、従来の考え方を述べる。さらに、ひびわれを予測する上で重要な、ひびわれ発生条件に関連するコンクリートの強度や伸び能力について、従来の研究を総括することとする。また、最後に、現在までに行われているひびわれ防止対策について触れる。すなわち、第2章によって、本論文の導入部とするとともに、各章の位置づけを明確にすることを試みたものである。

第3章は、マスコンクリート部材が、既設のコンクリートなどによって拘束される場合の拘束度について論じるものである。特に現在まで不明確であったマスコンクリート部材の高さ、長さ比が拘束度を与える影響を明確にすることを試みたものであり、有限要素法を用いた諸解析結果から、拘束度を算定する式を提案することを行う。

第4章は、解析に用いる特性値として、強度、ヤング係数、およびクリープを採り上げた。前2者についてはマスコンクリート部材から採取したコアによって、検討し、硬化促進の影響や、ひびわれ推定に用いる場合の定量的表現について考察を加える。後半にはマスコンクリート部材の特徴である、若材令でシールされたコンクリートのクリープについて実験を行い、その特性を明らかにするとともに、従来の多くの提案式との適合性を検討する。

第5章では、第3章における拘束度の研究から、マスコンクリートの応力推定をコンクリート部と弾性バネから構成される単純拘束モデルで表されることを見出し、これを用いた解析方法の提案を試みる。このコンクリート部をいくつかの要素に分けることにより、内部拘束、外部拘束の両方を受ける部材の解析にも適用できるよう展開を行う。また、コンクリートの若材令からの物性変化を、従来の研究や第3章で確認された現象から忠実に数量化して、計算に導入することを試みる。解析解は逐次計算によって得るものとし、この具体的な計算方法をも明らかにする。

第6章では、従来、実構造物で応力やひずみが測定されていたが、これに代って実験室でも行いうるマスコンクリートの応力測定方法を提案する。この実験装置を用いて、応力発生過程を追跡すると共に、第5章で示した計算方法の妥当性を検証することとする。

第7章では、第5章の成果をもとに、シュミレーション解析を行い、マスコンクリートの熱応力に対する、クリープによる応力緩和の度合を明らかにすることを試みる。さらに従来の研究において、発生応力が強度を越えた場合にひびわれが発生するとしていた、いわゆる決定論に代って、ひびわれ発生を確率的事象としてとらえることを考え、従来の工事記録からひびわれ安全率とひびわれ発生確率の関係を求め、ひびわれに対する設計法を提案する。

第8章、第9章は以上の研究の代表的マスコンクリートに対する、応用展開例と、具体的な対策について述べるものである。第8章では、大型の貯蔵タンクや格納容器を有する構造物をモデルとし、第9章では、ポンプ圧送工法によるダム施工を対象としたものである。第8章では、材料として中庸熟フライアッシュセメントと流動化剤を用いることを対策の一つとして採りあげ、このコンクリートの特性について述べる。さらにベースマットや円筒格納壁のひびわれ解析を行い、ひびわれ防止のための諸対策とその効果について考察を加える。

第9章では、ダムのポンプ施工用に考えられた高炉、フライアッシュセメントを結合材とした大粒径骨材を有する流動化コンクリートの特性について実験を行い、ダムコンクリートへの適合性や留意点を検討する。また、シミュレーション解析により、ダム施工におけるセメント量や打設ブロックの大きさの決定について基本的な資料を得ることを試みる。さらに、このようなコンクリートがポンプ圧送に供しうるかを確認するため、現場実験を行い、考察を加える。

第10章では、結論として第3章から第9章において得られた結果と本論文の成果をとりまとめると共に、今後の残された課題を述べる。

本論文では、マスコンクリートの温度解析は比較的容易に精度よく解析できることから省略した。この温度解析と本論文の各章とを併せれば、独自のマスコンクリートのひびわれ予測システムとして、その根拠や応用を含めて構成されるよう意図したつもりである。

第2章 マスコンクリートにおける熱応力に関する既往の研究

本章においては、本論文に関連する既往の研究を概観し、研究の現状について述べると共に、残されている課題を明確にする。

ここでは、マスコンクリートの熱応力算定方法、これに関連する特性値として拘束度、ヤング係数、クリープ、温度変化量、および ひびわれ発生に関する強度、引張ひずみ限界、および ひびわれ発生条件などに分けて述べることにする。

また、最後には現在採用されているひびわれ防止、制御の方法についても触れる。

2.1 マスコンクリートにおける熱応力の計算方法

2.1.1 はじめに

マスコンクリートに生じる熱応力としては、よく知られているように、水和熱あるいは 外気温の変化によって部材内に不均一な温度分布を生じたために生じる自己拘束応力または内部拘束応力と、水和熱による部材の熱伸縮が、既設のコンクリートや岩盤などによって、外的に拘束されることによる外部拘束応力の2つに分けることができる。ここでは便宜上これらの各々に分けて、これらの既往の提案式を概観し、内容や特徴について述べると共に、合理的な計算方法を確立するための課題を明らかにする。

2.1.2 内部拘束応力計算法

高さ $2h$ に比べて、十分に長いボアソン効果の無視できる長方形板において、部材内に $T(y)$ なる温度変化を生じた場合に発生する応力 $\sigma(x)$ は、弾性学で古くから知られているように次式で与えられる。⁽¹⁾

$$\sigma(x) = -\alpha E T + \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \alpha E T dy + \frac{3y}{2h^3} \int_{-h}^h \alpha E T y dy \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、 α : 熱膨脹係数、 E : ヤング係数、

本式は力および中立軸まわりのモーメントのつりあいを考えた Compensation Line 法としても広く知られている。

$T(y)$ が対称な放物線である場合には、

$$\sigma(x) \Big|_{y=h} = \frac{2}{3} \alpha E \Delta T, \quad \sigma(x) \Big|_{y=0} = -\frac{1}{3} \alpha E \Delta T \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

となり、マスコンクリートの応力算定に広く用いられてきた。

後述する塚山、小野の内部拘束応力の計算法を始めとして、多くの研究は基本的に本式に基づいている。但し、小野は多くの温度分布の数値計算結果より、係数 $2/3$ の代りに、 $3/8$ とすることを提案している。⁽³⁾ また、G. Wischers⁽⁴⁾ は部材厚の大きさに従って、 $0.5 \sim 1.0$ の値を採るように推奨している。

しかし、打設直後から刻々と温度分布が変化するマスコンクリートの初期熱応力を評価するにあいには、ヤング係数をも時間の関数と考え、応力増分の総和として、式(3.3)により解をもとめる必要がある。増分和としない場合は、温度の相対的な変化に伴い、引張から圧縮に転じることとなり、現象的にも異なった結果を示す。この理由から、上記のような解析解によらず、増分を主とした数値解析で応力を求める試みもなされている。

$$\sigma_n(x) = \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i(x) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

例えば、小沢⁽⁵⁾ はダムコンクリートの打設直後から発生する熱応力に関する研究において、平面応力状態で、温度変化 $\theta(x, y)$ が生じた場合の応力を、

基本式

$$\frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

で表される応力関数 $\chi(x, y)$ を差分法によって解くことにより求めている。

さらに、クリープ関数から応力緩和率 η を計算によって求め、これに、各時間ごとに生じる弾性応力を乗じることによって、クリープ解を求めている。

また、鈴木らは、超早強セメントを用いた円柱状マスコンクリートに生じる内部拘束応力の解析を三角形リング要素を用いた有限要素法で行っている。⁽⁶⁾ この中で積算温度によるヤング係数、載荷時材令を考えたクリープ係数を実験的に求め、解析に反映しており、解析上、先駆的な役割を果たしている。

森本らも⁽⁷⁾ 6面体複合要素を用いた3次元有限要素法により、マスコンクリートの内部拘束応力の解析を行っている。

また、このような解析は、不均一な収縮による応力や、蒸気養生におけるひびわれ防止のための養生管理にも適用されている。

以上のように内部拘束応力は外部拘束応力に比べて、拘束系については比較的単純であるといえ、温度変化が求まれば、応力の解析解も容易に得られる。しかし、ヤング係数の表現については、外部拘束応力の場合と同様の問題、すなわち、硬化促進の影響、経時変化、クリープの影響などを計算上どう取入れるかの

課題がある。

2. 1. 3 外部拘束応力算定法

(1) 各種算定方法

マスコンクリートの外部拘束応力の算定法は、算定する系の定め方、材料特性の取扱い、必要な精度などによって、多くの各種提案が行われている。これらを一覧すると、マスコンクリート構造物と拘束体を合せた全体系を解析の対象とするものと、マスコンクリート部分の代表的な、あるいは最大応力を生じる一断面を解析するものの、2種に大別される。前者の代表的なものとして有限要素法があり、最近では有限プリズム法、境界要素法の適用が論じられている。

後者について、現在までに提案された代表的な方法の概要を以下に示す。

(a) ダムでの一般式⁽⁸⁾

応力算定を温度上昇域と下降域の2段階に分けた次式を用いて、一般に評価している。すなわち初期に生じる圧縮応力をも評価していることが特徴である。

$$\sigma_{t, \max} = R \alpha [(T_1 - T_2) E_{c2} + T_1 E_{c1}] \dots\dots\dots (2.4)$$

T_1 : 材令約1ヵ月までのコンクリートの最高温度

T_2 : 最終安定温度

E_{c1} : 最高温度までの平均ヤング係数

E_{c2} : 材令約1ヵ月から最終安定温度までの平均ヤング係数

R : 拘束度, α : 熱膨脹係数

拘束度 R はアメリカでの研究を参考に次のように定められることが多いが、最近では有限要素法も用いられている。

$$R = 1 / (1 + 0.4 E_c / E_g) \dots\dots\dots (2.5)$$

E_g : 岩盤のヤング係数

(b) 塚山の方法⁽²⁾

発生応力は内部拘束(σ_1)および外部拘束(σ_2)の和の次式であらわしている。

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{2}{3} \alpha E_c \Delta T + R \alpha E_c T_m \dots\dots\dots (2.6)$$

R : 拘束度, α : 熱膨脹係数

ここに、表面と内部の温度差 ΔT および部材内の平均最高温度 T_m は、それぞれ

れ多くの実測例から部材内最高温度 T_{max} と次の関係のあることを見出した。

$$T_m = q T_{max} = 0.8 \times T_{max} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\Delta T = p T_{max} = (0.1 + 0.25 \sqrt{W}) T_{max} \quad \dots\dots (2.8)$$

W : 部材厚 (m)

(2.6) - (2.8) 式より

$$\sigma = \alpha E_e \left(\frac{2}{3} p + R q \right) T_{max} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

さらに、有効ヤング係数 E_e および引張強度 σ_t をそれぞれ

$$E_e = 0.63 E = 0.63 \times 1300 \sigma_c$$

$$\sigma_t = 1/10 \sigma_c$$

として、圧縮強度の σ_c の関数で与え、ひびわれ条件式

$$T_{cr} < \frac{12}{0.1 + 0.25 \sqrt{W} + 0.8 R} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

を導いている。拘束度 R としては構造物の測定から 0.2 ~ 0.7 の範囲としている。以上のように本式では極めて基本的な式を基に、簡易な応力推定と、ひびわれ予測を行うことを主眼としたものといえる。塚山らは本式を多くのマスコンクリート構造物の評価に用い、比較的よい適合をみたと報告しており、我が国のマスコンクリートのひびわれ推定において、最近の研究の原点となったものである。

(c) 小野らの方法 ⁽³⁾

外部拘束による最大引張応力を次式で表している。

$$(\sigma)_{max}^t = \alpha R E_e (T_p + T_{m,r,max} - T_{m,t}) \quad \dots (2.11)$$

T_p : 打ち込み温度

$T_{m,r,max}$: 部材平均温度の最大値

$T_{m,t}$: 材令 t における平均温度

上式中、拘束度 R は、⁽²³⁾ 森式や⁽²⁵⁾ FEMにより基めた算定式を用いている。
また有効ヤング係数 E_e は

$$E_c = A(t) B(t) \sigma_{cb}(t) \\ E_c(t) = A(t) \sigma_{cb}(t), B(t) = 1 / (1 + \phi(t)) \\ \sigma_{cb}: \text{圧縮強度}, \phi(t): \text{クリープ係数} \quad \dots\dots (2.12)$$

とし、クリープの影響を加味することとしているが、 ϕ の定め方については、言及していない。

平均温度降下量 $T_p + T_{n,r,max} - T_{n,l}$ のうち、最終安定温度 $T_{n,l}$ は、一ヵ月、1～6ヵ月、6ヵ月以上の3期に分けて評価すべきことを提案している。
また、

$$T_{n,r,max} = (3 T_{r,max} + T_{s,r,l}) / 4 \quad \dots\dots (2.13)$$

$T_{r,max}$ = 部材内最高温度

$T_{s,r,l}$ = 表面温度の最大値

と近似できることを、数値計算より見出し、外部拘束によるひびわれ発生条件式として、次式を与えている。

$$T_{max} \geq \frac{1}{3} \left[\frac{1}{10 \alpha_c A(t) B(t) R} + 4 T_{n,l} - (T_p + T_{s,r,l}) \right] \quad \dots\dots (2.14)$$

以上のように、各々の特性値の与えかたは異なるものの、基本的には塚山式と同様、増分によらない単一の算定式を基本としている。ただし、塚山は内部拘束、応力と外部拘束の最大応力の和を用いてひびわれ条件式を求めているのに対し、これらを独立に取扱っている。部材内温度差によるひびわれ発生条件式としては

$$T_{max} - T_s \geq \frac{0.22}{\alpha_c A(t) B(t)} \quad \dots\dots (2.15)$$

を与えている。

(9)

(d) 山崎の方法

種々のマスコンクリート構造体での温度および、ひびわれ測定結果から

$R = E' A' / (E A + E' A')$ 、(E 、 E' および A 、 A' は、それぞれ拘束体、被拘束体のヤング係数および断面積) で求めた拘束度 R と温度降下量 ΔT の関係を座標上に求めると、ひびわれの発生の有無は

$$\Delta T \cdot R = 10 \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots\dots (2.16)$$

で表せる曲線上に境界があることを見出し、大略なひびわれ発生の判定式として

提案している。

本式は、 $\sigma = R \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot E$ において、ヤング係数と引張強度に線型関係が近似的に成立するとした場合に容易に得られるものである。

(e) 青柳らの方法^(10,11)

ひびわれ判定のための拘束実験装置を用い、拘束応力発生開始材令および温度下降速度を変化させた14体の供試体のひびわれ発生実験から、

$$\Delta T_c \cdot R I \geq 7.67 \quad (^\circ\text{C}) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

$R I$: 拘束度

ΔT : 温度下降量

なる関係が成立する場合に、ひびわれが生じたことを認めている。本式は山崎の提案と同様の型となっているが、主としてトンネルの2次覆工コンクリートのひびわれ問題に適用し、ひびわれ防止に有効に活用している。

(f) 夏目らの方法⁽¹²⁾

各時間ステップにおける弾性応力増分 $\Delta \sigma_i$ を求め、クリープ係数を用いた低減をこれに考慮し、重ね合わせ法が成立つとして、 $\Delta \sigma$ の総和により n ステップ目の応力を求めることとしている。すなわち

$$\sigma_n = \sum \frac{\Delta \sigma_i}{(1 + \Phi_{i,n})} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

$\Phi_{i,n}$: i ステップでの応力増分に対する
 n ステップにおけるクリープ係数

本研究ではクリープ実験によって、次式の間係を認めており、多くの研究の中でクリープの取扱いを明確にしている点に特徴がある。

$$\phi_{te} = 3.9 (1 - e^{-0.17 te}) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\Phi_{t_0, t_1} = \frac{E t_0}{E_{28}} (\phi_{t_1} - \phi_{t_0}) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

(g) 海外での算定式

海外においても、応力算定の方法については基本的にはダムのひびわれに関する研究をもとに、(a)と同様の方法が採られているようである。^(13,14)例えば、

Wischers⁽⁴⁾は、内部拘束、外部拘束に対しそれぞれ次の式を提案している。

$$\sigma = K d \Delta t \alpha \frac{E}{1 + \phi} \dots\dots\dots (2.21)$$

K d : 薄い部材で 0.5, 厚い場合に 1.0

ΔT : 部材内温度差

E : 0.5 ~ 5 × 10⁵ kg/cm²

ϕ : 0 ~ 1.0

$$\sigma = K (t_4 - t_1) \alpha \frac{E}{1 + \phi} \dots\dots\dots (2.22)$$

K : 拘束度, 一般に 0.8 以上とする

T₄ : 最高温度, T₁ : 基礎の平均温度

最近では、ひびわれ発生は避けられないものとし、英国では主として目地や鉄筋でひびわれ幅を制御する方法⁽¹⁵⁾、米国やドイツでは鉄筋によりひびわれ幅を制御する方法が提案されており、ひびわれ発生予測法に関する研究は少ない。^(16,17)

(h) 系全体を解析する方法

系全体を解析する方法として有限要素法がある。有限要素法によれば、拘束度に関する不明解な点が除去できること、ボンドリンクや境界面のコンクリートの特性値により付着の問題や粘弾塑性の問題をも取扱える事等、多くの優れた点を有しており、マスコンクリートの応力解析への適用例も多い。^(18,19,20) さらに最近では境界要素法の適用も試みられている。⁽²¹⁾ しかし、コンクリートの特性値の与え方に関する問題は簡易法とも共通であること、および現在の所、解析に時間を要し、実用的、汎用的方法とまでは至っていないという課題を有している。後者は電算機の急速な発展と共に解決されると思われ、むしろ基本的なコンクリートの特性の、実験による説明こそ、緊急の課題といえよう。

(2) 各種算定法における現状と課題のまとめ

(1) に述べた算定式は基本的には次の式を基本としている。

$$[\text{応力}] = [\text{拘束度}] \times [\text{ヤング係数}] \times [\text{膨脹係数}] \times [\text{温度変化量}]$$

拘束度 R については次節で述べるように、構造体の形状、打継目の付着特性、ヤング係数比および位置の関数として与えられるが、上記の諸提案の大部分が時

間的に一定値として取扱っている。特にヤング係数については変化が大きいことから、拘束度は本来、材令の関数として与えられるべきものと考えられる。

また、特にブロックの形状の影響については、明確にする必要がある。

さらに大きな課題として付着界面の特性の拘束度に与える影響が残されているが、これについては全く未知の状況にある。

線膨脹係数 α は、材料、配合、材令、鉄筋量などによって影響されるとする多くの研究がある。この中で骨材の岩種による影響が特に大きい事が認められており、解析には、使用する材料、配合でのコンクリートの実測値を採用するのを原則とすれば、さほど大きな影響を与えるものではないといえる。

しかし、最近の研究で、材令による膨脹係数の変化や、鉄筋との差による附加応力⁽²²⁾の問題が新たに提起されている。

ヤング係数 E は、材令あるいは、強度の関係式で経時変化を評価しているものが多い。またクリープによる応力緩和を換算ヤング係数の形で評価しているものが大部分であり、厳密解で求めたものは少く、静ヤング係数に対し一定値を乗じるか、 $E_e = E / (1 + \phi)$ の最も簡易な形で評価しているものが多く、クリープ自体の研究と共に、クリープ評価式の表現について課題がのこされている現状にある。

温度変化量 T については、簡易な方法では、部材内平均最高温度と安定温度の差が採られている。しかし、温度上昇時に圧縮応力が蓄えられ、ひびわれ発生に影響を及ぼす事が知られており、ダムの方法のように最低限、温度上昇域、下降域に分けた取扱いが必要と思われる。さらに、厳密には、年間を通じての気温の変動や乾燥収縮を考慮する必要がある。

簡易性を重視した場合は別として、以上の諸特性を合理的に評価した算定法を確立するためには、上式のように単一の算術式で表すことには限界があり、上述中の夏目らの方法のように応力増分を重ね合せる方法を用いることが必要であると考えられる。

次節に拘束度、ヤング係数およびクリープの取扱いおよびひびわれ発生条件に分けて各々に関する研究をさらに詳細に述べることとする。

2. 2 解析上の特性値とひびわれ発生条件

2. 2. 1 拘束度

熱応力は熱変形が拘束を受けた場合に生じるものであるので、この拘束の度合を適切に評価することが計算精度に大きな影響を与えることは論をまたない。

外部拘束については、古くからダム施工時の熱応力評価に関連して研究が行われている。ACI 207 委員会報告では、1940年代の米国総合開発計画におけるダム建設に伴う諸研究から、底面で連続的に拘束されたときの長方形壁の高さ方向の拘束度分布を、図-2.1 に示すように与えている。⁽¹⁶⁾ 拘束度、被拘束体の剛性が与えられた場合には、Zangerらの研究をもとに、次式で与えられるMを乗じたものを拘束度としている。

$$M = 1 / (1 + A_1 E_1 / A_2 E_2) \quad \dots\dots\dots (2. 23)$$

A_1 、 A_2 : 被拘束体、拘束体の断面積

E_1 、 E_2 : 被拘束体、拘束体のヤング係数

なお、被拘束体が岩盤のように半無限体に近いときには

$A_2 = 2.5 A_1$ すなわち

$$M = 1 / (1 + 0. 4 E_1 / E_2) \quad \dots\dots\dots (2. 24)$$

と、するとしている。

森は光弾性実験およびポテンシャルエネルギー最少原理による数値解析法による解析を行い、拘束体に生じる応力分布を明らかにするとともに、半無限体上、および長さが十分にある壁体を同幅の基礎で拘束された時の拘束度をそれぞれ次式で表している。⁽²³⁾

$$R = 1 / (1 + 0. 4 \kappa) \quad \dots\dots\dots (2. 25)$$

$$R = 1 / (1 + \kappa^{0.7}) \quad \dots\dots\dots (2. 26)$$

ここに、 $\kappa = E_1 / E_2$

すなわち、基本的には κ の一次式もしくは指数式の逆数の形で拘束度を表している。

以上は、いずれも一様な熱収縮に対応するものであるが、現在と比べるとはるかに困難な解析条件下で、最も基本的な拘束形態について計算を行っており、現

在でも多くの適用をみている。

その後、1970年からの有限要素法の開発や、電子計算機の発達と共に、解析能力は著しく向上したにもかかわらず、拘束度について体系的な整理は必ずしも十分行われてはいない。

永山らは半無限体上に打設された場合の拘束度とヤング係数比 κ の関係を H/L をパラメータとして求めているが、 H/L の影響が、極めて大きい事を示しており、⁽²⁴⁾十分に H/L が小さい場合でも 森式とは一致していない。

小野は、⁽²⁵⁾有限要素法による解析を行い、拘束度 R は κ の他に拘束体の高さ H と長さ L の比(H/L)に影響を受けるが、 L/H が 10 以下では、森の式とよい一致をみたが、大きい場合には過少に評価する傾向のあることを示している。

しかし、森は(2.25)式は比較的 H/L の大きい場合に適用できるものであることを述べており、 H/L が小さくなれば、拘束度は大きくなることを示唆している。

最近の研究の中では、コンクリート工学協会、マスコンクリートの温度応力研究委員会の活動がある。すなわち、地盤上に種々のセメント量で打設された場合の応力解析を有限要素法を用いて行い、次の点を明らかにしてる。

- (1) 軸方向拘束と共に曲げ拘束についても配慮する必要があること
- (2) 曲げ拘束に関しては、場合によっては過拘束($R > 1$)となることもあること
- (3) 図-2.2 に示すように、拘束体の高さ H と長さ L の比(H/L)とヤング係数比をパラメータとして拘束度が与えられる

このように従来、一様な軸方向温度変化に対する拘束問題を取扱った場合が多いが、曲げ拘束の概念が新たに導入された点は注目に値するといえる。

以上のように古くに行われた拘束度の評価方法は、解析手法の発達と共に多くの課題を含んでいることが明らかになった状況にあり、改めて基本的な拘束度に関する研究を行う必要性が認められる。

また、打継目においては、せん断力と共に鉛直力が作用することから“すべり”が拘束度⁽²⁶⁾に大きな影響を与えることが予想される。原口らはFEM解析において、打継境界部のヤング係数を変化させることによってこの影響を配慮した結果、応力、ひずみの実測値と計算値は比較的よい一致をみたと報告している。しかし、材料、配合、打継目の粗さ、せん断筋などがすべりに与える影響については、定量的には十分研究されているとは云えない。

(28)

(27)

杭拘束については野尻ら、関島らの研究があり、杭頭を剛結、あるいはヒンジ結合した場合の差は小さく、均しコンクリートで杭間の変位が拘束された場合でも 0.1 以下であったことを数値計算で認めている。また、塚山らも杭拘束をう

けた基礎版に埋設したひずみ計の挙動から、拘束度は 0 ～ 0.4 であったことを報告している。⁽²⁾すなわち、杭拘束は、既設のコンクリートや岩盤により連続的に拘束された場合に比べれば、拘束は小さいものと結論づけすることができよう。

2. 2. 2 ヤング係数およびクリープ

応力算定上、ヤング係数の水和熱の影響をも加味した経時変化を把握する必要があるが、これについては、多くの適用可能な研究が報告されている。これらは、(1)ヤング係数を積算温度の関数として表示したもの、(2)圧縮強度(場合によってはコンクリートの比重を含む)との関係式で表示したものに分けられるが、後者の関係式の圧縮強度は積算温度と前述のように関連するので、基本的には(1)、は(2)に包含される。

各国の基準類でも設計用値として(2)の形式で次のように与えられている。

$$E_c = 2.1 \times 10^4 \sqrt{\sigma_{cb}} \quad (\text{CEB-FIP})$$

$$E_c = 1.53 \times 10^4 \sqrt{\sigma_{cb}} \quad (\text{ACI 318})$$

$$E_c = 2.10 \times 10^5 \sqrt{f_c / 200} \quad (\text{AIJ, RC規準})$$

従って、ヤング係数は、特に簡易式を用いる場合、クリープを含めたヤング係数の計算上の取扱いが、むしろ重要となる。まず基本となるクリープについてはマスコンクリートでは、水分逸散の少ない環境下での初期材令を含む載荷時材令の影響、および温度の影響についての取扱いが重要であるが、基準類の中で、これらの問題がどう表されているかを以下に述べる。

CEB-FIP, 1970においては、⁽³²⁾クリープ係数 ϕt を $K_1 \sim K_5$ の5つの係数の積として表しており、この中で、環境条件に関する係数 K_1 、載荷時材令に関する係数 K_2 、部材仮想厚に関する係数 K_4 が図で与えられており、また進行度についても仮想厚をパラメータとしていることから、マスコンクリートに対する適用性も高い。

1978年においては、⁽²⁹⁾Rüsch らの研究をもとに、クリープを初期変形 (ϵ_a) 遅延弾性ひずみ (ϵ_d)、フロー (ϵ_f) の3成分つぎのように表示している。

$$\epsilon = \epsilon_a + \epsilon_d + \epsilon_f$$

$$= \frac{1}{E_{c28}} [\beta_a(t_0) + \phi_d \beta_d(t - t_0) + \phi_f \{ \beta_f(t) - \beta_f(t_0) \}] \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

載荷時材令は ϵ_a 、 ϵ_f において、部材寸法およびマスコンクリートである事に関連する湿分の影響は ϵ_f の中で表現されており、後述する Bažant の研究とともに、多くのデータを基に総括的に表現されていることを考えると、適用性は高いものと考えられる。

ACI (1978) においては、

$$\phi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \phi_{\infty}(t_0) \quad \dots\dots (2.28)$$

$$\phi_{\infty}(t_0) = 2.35 K_2 K_1' K_4 K_5 K_6 K_7$$

とし、厚さの影響を K_4 で、湿分の影響を K_1 で示している。

これらの式では、載荷までの温度の影響は有効材令を用いることで考慮しているが、載荷中の温度のクリープへの影響は含めていない。

Bazant, Panula⁽³¹⁾ は、基本クリープ $\Phi_b(t, t_0)$ を、

$$\Phi_b(t, t_0) = B[(t)^{-m} + 0.05](t - t_0)^n \dots\dots (2.29)$$

で表し、係数 B, m, n を28日強度の関数として与えている。また、多くの関係式を用いて環境湿度、部材寸法の影響を表現している他、 B, n を温度の関数として与えている点に特徴がある。

Neville⁽³²⁾ は、湿分の影響に対し図-2.3 を与えている。この図から明らかのように、マスコンクリートの特徴である水分の逸散の少い部材厚の大きな場合では、算定法による差は比較的小さい事が予想される。

温度の影響に関しても多くの研究がある。このうち、シールされた試験体について測定されたものとして、Nasser⁽³²⁾, Hannant⁽³³⁾, 河角⁽³⁴⁾らの研究をもとに、20℃ (21℃) を1としたときの温度の影響を図-2.4 に示す。これらによると、常温から70℃ 程度であれば、温度とクリープの間には線型関係があるとみなせよう。

つぎに、クリープの影響を熱応力の計算上どう表現するかについてであるが、各種の方法についてCEB-FIPにおいてChiorio⁽³⁵⁾らが総括している。

熱応力算定におけるクリープ評価方法の最も簡易な方法として有効ヤング係数を用いる方法があり、しばしば用いられている。しかしながら、適用にあたっては、十分にその意義を把握しておく必要がある。すなわち、 $\epsilon_t, \epsilon_{II}$ をそれぞれ全ひずみ、自己ひずみ C をクリープ関数とすると

$$\epsilon_t(t, \tau) - \epsilon_{II}(t) = \sigma(\tau) \Phi(t, \tau) + \int_{\tau}^t \Phi(t, \tau) d\sigma(\tau) \\ [\Phi(t, \tau) = 1/E(\tau) + C(t, \tau)] \quad \dots\dots (2.30)$$

において、

$$\int_{\tau}^t \Phi(t, \tau) d\sigma(\tau) = [\sigma(t) - \sigma(\tau)] \Phi(t, \tau) \dots\dots (2.31)$$

と仮定するものである。上式から、

$$\begin{aligned} \varepsilon_t(t, \tau) - \varepsilon_0(t) &= \sigma(t) \Phi(t, \tau) \\ &= \sigma(t) \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\phi(t, \tau)}{E_{c28}} \right] \dots (2.32) \end{aligned}$$

従って有効ヤング係数 E_e は

E が変化するとき

$$E_e = \frac{E(\tau)}{1 + E(\tau) \phi(t, \tau) / E_{c28}} \dots (2.33)$$

E が一定のときには

$$E_e = \frac{E}{1 + \phi(t, \tau)} \dots (2.34)$$

となり、マスコンクリートの応力評価式において広く用いられている。

塚山は ϕ を 0.5 一定と仮定している。小野は (2.12) 式で $B(t)$ を示しているが、載荷時材令を含む $\phi(t, \tau)$ ではなく、 $\phi(t)$ として与えており、 $\phi(t)$ の具体的数値については論述していない。

(36)
中内らは、⁽³⁶⁾ 構造物内で測定したひずみと、応力から求めた有効ヤング係数と実験室での供試体のヤング係数とを比較し、初期で前者は後者の 60 ~ 80 %、1 週以上の材令で 55% であったことを認めている。

(12)
夏目らは有効ヤング係数法に忠実に基づいた解析を行うと共に、初期材令載荷を含むクリープ実験を行い、クリープ速度が、 $\phi' = 0.67 e^{0.17t}$ で表示出来ることを見出し、これを基にした応力解析を行い、有効応力計による拘束応力測定結果と計算値がよい対応を示したことを確認している。

しかしながら、上記のように、有効ヤング係数法は、 $t \sim \tau$ における応力変化を無視した基本仮定のあること、クリープ特性は 材料、配合、温度などによって異なること等から、上記の研究のように、単純に定めることは容易な方法ではあるが、理論的根拠に欠けると言わざるを得ない。

クリープ解のより精度のよい方法として、次に示す平均応力法 (Mean Stress Method) や、材令補正有効ヤング係数法 (Age-Adjusted Effective Modulus Method) がある。

これらにおいては、ひずみの基本式 (2.30) を、それぞれ次式で近似し、有効ヤング係数、あるいは応力解をもとめるものである。

$$\varepsilon_t(t, \tau) - \varepsilon_n(t) = \sigma(\tau) \bar{\varepsilon}(t, \tau) + [\sigma(t) - \sigma(\tau)] \cdot \frac{\bar{\varepsilon}(t, t) - \bar{\varepsilon}(t, \tau)}{2} \quad \dots\dots (2.35)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_t(t, \tau) - \varepsilon_n(t) = & \sigma(\tau) \bar{\varepsilon}(t, \tau) \quad \dots\dots (2.36) \\ & + [\sigma(t) - \sigma(\tau)] \cdot \left[\frac{1}{E_c(\tau)} + \chi(t, t_0) \frac{f_{28}(t, \tau)}{E_{c28}} \right] \end{aligned}$$

これらの式による、ひずみの計算方法の差を Chiorinoらは 図-2.5 に示すように与えている。この計算例では、材令28日で載荷された場合であるが、有効ヤング係数法はクリープひずみを大きく、従ってマスコンクリートのように若材令で載荷される場合には、応力緩和を相当大きく評価している可能性のあることが明らかである。

マスコンクリートの熱応力解析は、ひずみが与えられるので、基本的には式(2.30)の積分方程式を解くこと、または下式のレラクセーション関数 $\eta(t, \tau)$ を求めることにある。

$$\sigma(t) = \eta(t, \tau) d[\varepsilon_1(\tau) - \varepsilon_2(\tau)] \quad \dots\dots (2.37)$$

(5)
小沢はダムコンクリートにおいて、クリープひずみを

$$\varepsilon_c = f(k) \cdot \ln(t+1) \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

K: 載荷時材令

t: 載荷後経過材令

で与え、クリープひずみを打消す応力を算定することで、緩和曲線 $\eta(t)$ を求め、次式で近似している。

$$\eta(t) = a + b e^{-c\sqrt{t}} \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

最近の目ざましいコンピュータの発達を考える時、step-by-step法などの数値解析法をもちいれば、これらの解を求めることは比較的容易である。

しかしながら、野中は引張応力場での応力緩和試験を行い、緩和率を求めているが、数日で完全に緩和される場合もあることを認めており、引張応力下では比例限界、クリープ限の問題をも厳密には考慮しなければならないことを示唆している。

上述のようにクリープに関する研究、計算方法については多くの研究が行われているにもかかわらず、マスコンクリートの研究には、これらを十分に取入れられていない現状にあり、改めて定量的な検討や算定式の表現を考える必要があると言える。

2. 2. 3 圧縮強度

マスコンクリートの研究を進める上で、圧縮強度は前述したヤング係数、引張強度などと密接に関連する特性値であることから、重要な意味を有している。

研究成果のうち、特に、初期強度の発現、水和熱の影響、躯体内強度分布は、マスコンクリートにおける発生応力の推定やひびわれ予測の精度を高めるために、明確にされるべき対象である。強度発現に関する研究の多くは、材令と共に養生温度が関連することから、マチュリティ（積算温度）との関係で整理されている。

笠井は、⁽³⁷⁾加水後 2 ～ 3 時間から材令 3 日程度までの若材令のコンクリートを対象として、養生温度、セメントの種別、水セメント比を変化させ、初期材令においても、積算温度の対数値と圧縮強度との間には直線関係を認めている。

岡田らは、⁽³⁸⁾マスコンクリートに近い温度履歴を含む、10 ～ 60℃ の温度領域における実験から、竹下らは⁽³⁹⁾20、30℃の温度下で配合を変化させた実験から、また、洪⁽⁴⁰⁾はセメント種別、水セメント比を変化させた寒中コンクリートを対象とした研究から、LEW, REICHARD⁽⁴¹⁾は2 ～ 23℃ の温度下で材令 1 ～ 42 日の強度試験結果から、それぞれ

$$\sigma_c = A \log M + B \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

なる関係式を認めており、各々の研究において屈折点や定数は異なるものの、マスコンクリートの強度推定には、積算温度が有効な尺度であることは結論できよう。

しかしながら、マスコンクリートの温度履歴において、この関係が成立つ事を確認した研究は比較的少い。

一方、躯体内の強度と実験室での強度が必ずしも一致しないことや、躯体内の強度分布が一様でないことは広く認められている。⁽⁴²⁾

毛見らは、マスコンクリート部材から採取したコアの強度、ヤング係数は温度、乾燥の影響を除いても上下方向でかなり異なり、強度で100 kg/cm²程度の差が認められた事を報告しており、同様の報告も多い。

西村らも同様の実験を行い、⁽⁴⁴⁾練り上り温度によって、マスコンクリート部材のコア強度は大きく影響されることを認めている。

これらの要因はマスコンクリートの応力解析や、ひびわれ発生条件を定める上で、影響は大きいものと思われ、躯体の特性値を定量的に把握する事や、供試体強度との相関関係を明らかにしてゆくことが必要であることを示している。

2. 2. 4 引張強度 および 伸び限界

引張強度を圧縮強度または積算温度の関係式で表したものは、狩野⁽⁴⁵⁾、笠井⁽⁴⁶⁾、横道⁽⁴⁷⁾、竹下⁽³⁹⁾、Sen⁽⁴⁸⁾、A C I 等、多くの提案が知られている。これらの多くは、分数式、または指数式で表されおり、それぞれデータに基づき適合性が認められている。若材令でも、これらの関係が成立する事が分れば、マスコンクリートにも十分適用できるものと思われる。

しかしながら、これらの提案式における引張強度はいずれも、実験室において数分間で破壊に到らしめたものであるが、マスコンクリートにおいては、少なくとも数日から数ヶ月にわたって破断に到るものであり、いわゆる緩速載荷における引張強度を明らかにすることが重要である。

阪田は、⁽⁴⁹⁾コンクリートの圧縮応力場でのクリープ限についての研究を行い、応力比と生存確率の関係から、普通コンクリートに対し、静的強度比で84.5%であったことを報告しており、また引張応力場でもこの影響を加味すべきことを示唆している。

野中は、⁽⁵⁰⁾半日で破壊に到らしめた時の直接引張強度は割裂強度の約90%であること、乾燥により、さらに低下することを実験により確かめた。

Dubiago⁽⁵¹⁾も Skudraの研究をもとに、マスコンクリートの引張強度算定においては、通常得られるものの80%に低減すべきであると述べている。

以上のように、ひびわれ発生を予測する上で、引張強度は通常の試験室で得られる値から低減する必要があることが予測される。

破断条件として 引張強度に代って限界ひずみを用いることが考えられる。通常は $(100 \sim 200) \times 10^{-6}$ 程度としているものが多い。

Liu, McDonald⁽⁵²⁾ は通常載荷および緩速載荷の引張限界ひずみとして、それぞれ次式を与えている。

$$\epsilon_r = 0.34 (f_c')^{0.77} / E \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

$$\epsilon_s = 275 K (f_c')^{1.85} / E^2 \quad \dots\dots\dots (2.42)$$

また、緩速載荷による伸び能力の増加度 ψ は 1.1~2.1であり、

$$\psi = 3630 (f_t')^{1.39} / E \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

f_t' : 曲げ強度

となったことを、ダムにおける実験例から求めている。

Houghton⁽⁵³⁾の測定によると材令90日で破壊するようざん増荷重をかけた時の引張ひずみは、材令90日の通常試験のその 164/124, 110/95 倍であったことを認めるとともに、材令90日の緩速載荷による限界引張ひずみを算定する

式を提案している。

しかしながら、ひびわれ発生の予測にこのような引張限界ひずみを用いるとしても、力の釣合いが前提となり、計算上の困難さに変わりはないこと、一般には引張強度に比べて測定値にばらつきの大きいことが最大の問題となろう。

これらのひずみ限界における研究でも、マスコンクリートに重要である事は述べられているものの、具体的な適用方法については触れられていない。

2. 2. 5 ひびわれ発生条件の評価

ある構造体において算定された応力 σ_t に対し、構造体の有する強度を σ_{tu} としたとき、 $\sigma_t \geq \sigma_{tu}$ (あるいは、ひずみに対し $\epsilon \geq \epsilon_{tu}$) となったときに、ひびわれが発生するとする、いわゆる決定論的なひびわれ発生の取扱いが従来からなされてきた。しかし、材料強度 σ_{tu} は、あるばらつきを有することから、発生条件に関しては確率的な取扱いが必要であることは容易に想像される。

また、 σ_{tu} が試験で得られた値を用いる場合と実際の構造体強度とは一般に異なること、 σ_t も材料定数や算定上の仮定を含んでいる以上、誤差を伴うことから、ひびわれ安全率 σ_{tu}/σ_t とひびわれ発生の可能性の間には、各算定法において各々、特徴的な関係を示すものと考えられる。

本来、算定法は、このような確率論に基づき評価を行い、適合性の検証を経た上で提案されるべきであるが、これに関する研究は、極めて少く、次の例をみるのみであり、今後の研究が期待される項目の一つといえる。

Van Breugel は、⁽⁵⁴⁾ 図- 2. 6 に示すように、確率論によるべきことの、基本的概念を示している。

また、⁽⁵⁵⁾ 小野は、先述の簡易式をもとに、内部拘束、外部拘束に関する計算限界値と実際の値の比と、多くのひびわれ測定例の関係を調べ、図- 2. 7 に示すような発生確率を与えている。

これらの研究から、応力が引張強度以下であっても、ひびわれが発生する可能性が存在し、ひびわれを完全に避けるためには安全率を相当に高めなければならないことが予測される。構造物の重要性や、機能に応じてひびわれを制御するためには、このような確率論に基づいた研究が期待されている。

2. 3 ひびわれ防止、制御対策に関する既往の研究

2. 3. 1 はじめに

ひびわれを防止あるいは制御する方法としては、温度応力算定式から想定されるように (1) 温度上昇量を可能な限り少くする、(2) 拘束度を緩和する、および (3) 生じるひびわれを集中あるいは分散させ、有害にない程度に抑えるの、3方法に分類することができる。

諸論で述べたように、マスコンクリートにおけるひびわれが多くみられる原因としては、これらの対策の研究が必ずしも十分でないことと、これらと有機的に結び付けた簡易な計算方法のないことを挙げることができる。本論文は後者の問題解決を意図したものであるが、第8章、第9章では、主として材料によるひびわれ低減の具体的方法についても言及しており、このために、ここでは、現在まで採られている諸対策の方法と課題について概観しておくこととする。

2. 3. 2 温度上昇低減のための方策および温度管理

材料による温度上昇低減対策として、まずセメントが挙げられる。耐海水セメントなどの特殊なものを別とすれば、中庸熱セメントが発熱量の点で優れていることが広く認められている。^(56, 57)しかし、強度面も重視した中庸熱セメントでは、不十分なことも多く、より発熱量の少ないものが期待されており、特に早期強度を要しない構造物では、フライアッシュと高炉スラグを併用した経済性の高い3種混合セメントについて研究が行われている。⁽⁵⁸⁾また、グルコースポリマーを主成分とした水和熱抑制剤やマスコン用膨脹剤が発熱量、速度を制御する材料として注目されている。⁽⁵⁹⁾

コンクリートの供給における品質管理上の課題もあるが、これら材料による制御方法の応用開発が期待されている。

第2の方法として、セメント量の低減があり、このため低スランプでの打設、骨材最大寸法の増大、設計基準強度の延長などの対策が採られている。従来、ダム以外では材令28での強度管理が主体であったが、これでは低発熱性セメントで、強度面からセメント量が増加する矛盾が指摘され、原子力発電施設を始めとする大型構造物では積極的に判定材令の延長が行われ、ひびわれ防止の効果をあげている。また流動化剤は、従来のワーカビリティを保持して、セメント量を低減できることから、マスコンクリートへの適用が期待されている。スランプロスの少ないものも市販され始め、今後さらに用いられるものと思われる。

このような材料、配合による方法は、一般には以下に述べるものに比べて経済的であり、多くの対策中で最初に検討されるべき対象といえる。このためには、現状の施工体制の中での諸要求と、品質の均衡を満たす実用面での研究が必要となろう。

コンクリートの温度を下げる方法としてクーリングがある。プレクーリングは発熱速度、最高温度を下げる事から、有効な方法と思われる。セメントの冷却や、冷凍機、フレイクアイスによる冷却水の利用がダムなどでは行われているが、一般のコンクリートへの適用は経済的に困難であることが多い。この意味で最近、液体窒素を用いた方法が注目されている。⁽⁶¹⁾ パイクーリングについても、効果があったとするものが多いが、一般に高価である。この効果が2~3℃の平均温度降下によるものか、温度分布特性の人為的な変更によるものかは明確でなく、より合理的な温度管理と配管を行うためには、メカニズムの研究も必要と思われる。

温度管理の意味からは、温水養生や断熱材による制御がある。⁽⁶³⁻⁶⁶⁾ 内部拘束応力を低減し、潜在的な欠陥を予防する意味で効果はあることが想像できるが、撤去時期によっては、より危険となることがあると共に、外部拘束に対して有利かどうかなどは不明であり、この効果についても定量的な評価が行われる必要がある。

この他、外部拘束に対して、温床線を用い、橋梁のブロック施工におけるひびわれを制御した例もある。⁽⁶⁷⁾

2. 3. 3 拘束度の緩和

拘束度Rとブロックの高さと長さの比、 H/L の関係が、前述のように不明確であることが、制御方法としてのブロックの形状の決定を困難にしている。ブロックの高さは温度上昇の抑制に、長さは拘束度の緩和に有効と思われることから、今後検討されるべき大きな課題であると云える。さらに隣接ブロックの影響、目地の端部拘束緩和の影響などが将来の研究対象となろう。

打継界面でのすべりや、これに関連する表面処理、配筋の影響は、拘束度に影響するものと思われるが、現状では未知の領域にある。特殊な制御対策としては、超遅延剤による人工的なすべりによる応力緩和が検討されている。⁽⁶⁸⁾

2. 3. 4 目地や鉄筋によるひびわれ幅制御

前節で述べたように、欧米では、ひびわれ発生は避け得ないものとして、あらかじめ、目地や鉄筋によりひびわれ幅を制御する方法が提案されている。⁽⁷⁰⁾ 目地は擁壁、ボックスラーメン等の面外力を受ける構造体について比較的容易に設けられるものであり、上記の拘束緩和効果が明確にされれば、設計上から一般化されるべき方法といえる。これらについての研究は極めて少い現状にある。⁽⁶⁹⁾

鉄筋による方法については、理論的に多くの仮定があり、実際の効果との照合が行われる必要がある。一般には多量の鉄筋を要するため、必ずしも経済的とは言えない。しかし、通常の鉄筋比では、ひびわれ発生と共に鉄筋が降伏する可能性があり、この影響についても明確にする必要がある。なお、鉄筋による制御については、幅は小さいが、不規則なひびわれを多く発生することになるので、耐久性上からも疑問視する意見もある。⁽⁷¹⁾

【参考文献】

- (1) S. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity, MacGraw-Hill Book Co., 1934
- (2) 塚山: マッシブな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究, 学位論文, 1974
- (3) 小野: マスコンクリートの温度ひびわれ制御に関する一考察, セメント技術年報, 33巻, pp. 440-443, 昭和54年,
- (4) G. Wischers: Betontechnische und Konstruktive Massnahmen gegen Temperaturrisse in Massigen Bauteilen, Beton-Verlag GmbH, Dusseldorf, 1964
- (5) 小沢: マスコンクリートの初期にびわれとその防止対策に関する研究, 発電水力, No. 57, pp. 48-61, No. 59, pp. 19-39, 1962
- (6) 奥島他: 超早強コンクリートの水和熱によす温度応力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1201-1202 昭和48年 pp. 1203-1204, 昭和49年, pp. 9-10, 昭和50年
- (7) 森本: コンクリート構造物の温度応力解析における2, 3の問題点, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集 pp. 69-74, 日本コンクリート工学協会, 1982. 9
- (8) 建設省河川局: 多目的ダムの建設, 第3巻, 土木施工管理技術研究会
- (9) 山崎: マスコンクリートの外部拘束とひびわれ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 503-504, 昭和53. 9月
- (10) 佐々木他: シールドトンネル二次覆工コンクリートのひびわれ調査, 土木学会年次学術講演会概要集 pp. 523-524, 昭和56年10月
- (11) 石嶋他: 地中線シールド洞道二次覆工コンクリートに関する技術的検討について, 電力土木, No. 177, pp. 52-64, 昭和57. 3
- (12) 夏目他: セメントの水和熱に起因する温度応力の解析手法に関する研究, 鹿島建設技術研究所年報, 第28号, 昭和55. 7
- (13) R. W. Carlson: Temperatures and Stresses in Mass Concrete, Jour. of ACI, pp. 497-515, March-April, 1938
- (14) R. F. Blanks et al.: Cracking in Mass Concrete, Jour. of ACI, Vol. 34, pp. 477-495, March-April, 1938
- (15) 例えば, B. P. Hughes: Controlling Shrinkage and Thermal Cracking, Concrete, Vol. 6, No. 5, pp. 39-42, 1972. 5
- (16) ACI 207 Committee Rep.: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Jour. of ACI, Vol. 70, No. 7, pp. 445-470, July 1973
- (17) F. Leonhardt: Über die Kunst des Bewehrens von Stahlbetontragwerken Beton-und Stahlbetonbau, Heft 8, pp. 181-192, Aug. 1965

- (18) 田辺他：マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの外部拘束効果，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982.8, pp. 83-90
- (19) 原口他：Kダムにおける温度応力の解析と実測，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982.8, pp. 97-100
- (20) 梅原他：発電所基礎マットにおける温度応力の実測とその三次元解析，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982.8, pp. 65-72
- (21) 椿：外部拘束をうけるマスコンクリートの温度応力解析における境界要素の適用，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集コンクリート工学協会，1982.8, pp. 83-86
- (22) 入矢他：鉄筋がコンクリートの温度応力に与える影響に関する一考察，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982.8, pp. 73-76
- (23) 森：一辺が拘束された三角形ならびに四角形板の熱応力と拘束度について，土木学会論文集，第89号，pp. 45-53，昭和38.1
- (24) 永山，矢沢：コンクリートダムの温度応力解析，土木技術資料，22-9，pp. 26-32，1980
- (25) 小野他：マスコンクリートの外部拘束度に関する一考察，土木学会年次講演概要集，pp. 45-46，1981
- (26) 原口他：原子力，火力発電所の基礎マットコンクリートの温度，ひずみ，応力の実測ならびに解析，電力土木，第175号，pp. 63-72，昭和56.11
- (27) 関島：マスコンクリートにおける基礎くい群の拘束度の推定方法，セメント技術年報，Vol. 36，pp. 486-489，昭和57
- (28) 野尻他：マスコンクリート施工時の温度応力について，鹿島建設技術研究所年報，第19号，pp. 37-50，昭和46年
- (29) H. リュッシュ，D. ユングビルド（百島 訳）：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，鹿島出版会，昭和51年
- (30) ACI 207 Committee: Prediction of creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Oct. 1978
- (31) Bažant, Z. P. and Panula, L.: Practical Predictions of Time-Dependent Deformations of Concrete, Part 1-4, Materials and Structures, No. 65 1978, No. 66, 1978, No. 69, 1984
- (32) Nasser, K. W. and Neville, A. M.: Creep of Old Concrete at Normal and Elevated Temperatures. ACI. Jour., Vol. 64, pp. 97-103, 1967
- (33) Hannant, D. J.: The Strain Behaviour of Concrete under Compressive Stress at Elevated Temperatures, Report, Central Electricity Generating Board, June 1966
- (34) Seki and Kawazumi: Creep of Concrete at Elevated Temperatures,

- ACI. SP-34, pp.591-638, 1972
- (35) M.A.Chiorino (CEB): CEB Design Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete, Georgi Publishing Company
- (36) 中内他: マスコンクリートの温度応力解析, 間組研究年報, 1980, pp.159-179
- (37) 笠井: コンクリートの初期強度, 初期養生に関する研究, 学位論文 昭43.10
- (38) 岡田他: コンクリートの基本的特性に関する一考察, セメント技術年報, 第34巻, pp.230-233, 昭55
- (39) 竹下他: マスコンクリート物性の基礎的特性について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.27-34
- (40) 洪, 長島: 寒中コンクリート, 技術書院, 昭54.9
- (41) H. S. Lew and T. W. Reichard: Mechanical Properties of Concrete at Early Ages, ACI. Jour. Vol. 75, No. 10, pp. 533-542, Oct. 1978
- (42) 土岐他: セメントの硬化熱がマスコンクリート構造物におよぼす影響, 小野田研究報告, 第20巻, 第73号, pp.9-24
- (43) 毛見: 養生温度がコンクリート強度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.121-122, 昭51.10
- (44) 西村他: マスコンクリートの品質管理上の問題点の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.165-172 昭54.9
- (45) 狩野: コンクリートの引張に関する研究, 建築学会論文集, 第17号, 昭15.3
- (46) 笠井: コンクリートの初期引張強度に関する研究, コンクリートジャーナル, 1968.7
- (47) 横道: コンクリート橋, 技報堂, 昭47.11
- (48) B. R. Sen and A. L. Bharara: A New Indirect Tensile Test for Concrete, Indian Concrete Jour. Vol. 35-3, March 1961
- (49) 阪田: 持続および繰返し荷重下におけるコンクリートの塑性的挙動に関する基礎的研究, 学位論文, 昭51.6
- (50) 野中: 普通ポルトランドセメントコンクリートの温度ひびわれ発生に関する諸物性について, 農業土木学会論文集, 第91号, pp.51-58, Feb. 1981
- (51) V. D. Dubiagi: Criterion of Crack Resistance under Thermal Stresses for a Concrete Block Rigidity Fastened in the Foundation, Report No. PB 193610, US Dept. of Interior Bureau of Reclamation, 1936
- (52) T. C. Liu and J. E. McDonald: Prediction of Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol. 75, No. 5, pp. 192-197, May 1978
- (53) D. L. Houghton: Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete, ACI Journal, Vol. 73, No. 12, pp. 691-700, Dec. 1976

- (54) K. van Breugel : Relaxation of Young Concrete, Research Report-5-80
-D8, DELFT University of Technology, Dec. 1980
- (55) 小野：マスコンクリートの温度ひびわれの発生条件に関する一考察，
セメント技術年報，第35巻，pp.254-257, 1981
- (56) 中野：各種セメントを用いたコンクリートの性質（その2），大阪セメン
ト技報，no.47，pp.32-35，1980.8
- (57) 西他：各種セメントを用いたコンクリートの性状，小野田研究報告，
第32巻，第103号，pp.22-38，1980
- (58) 住吉他：フライアッシュ混入高炉セメントを用いたコンクリートの諸性質、
セメント技術年報 34，pp.287-290，1980
- (59) 安藤他：水和熱抑制剤を添加したコンクリートの基礎的研究，マスコンク
リートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，日本コンク
リート工学協会，pp.9-14，1984.3
- (60) K.R.Henriksen: Avoidance of Cracking at Construction Joints
between Solid Concrete Sections--Cooling of Fresh Concrete with
Liquid Nitrogen, nordisk betong, pp.17-27, 1-1983
- (61) 磯崎他：コンクリート橋脚のひびわれとその対策，土木技術資料，4-12，
pp.485-492
- (62) C.L.Townsend : Control of Temperature Cracking in Mass Concrete,
ACI SP-20, pp119-139, 1968
- (63) ACI Committee 207 : Cooling and Insulating Systems for Mass
Concrete, Concrete International, pp.45-64, May 1980
- (64) 神山：マスコンクリートの給熱保護，セメント技術年報，第18巻，
pp.400-404、昭39
- (65) 久保田：軽量マスコンクリートの養生によるひびわれ制御対策，土木学
会年次講演概要集，pp.113-119，昭53
- (66) ACI Committee 224 : Control of Cracking in Concrete Structures,
Jour. of ACI, Dec. 1972
- (67) 伊藤他：新旧コンクリート打継目に発生する温度ひびわれ防止対策につ
いての一考察，土木学会年次講演概要集，pp.257-258，昭52
- (68) 佐久田他：超遅延剤を用いたコンクリートの打設工法、竹中工務店、
研究所報、No.157, April 1983
- (69) 藤井他：鉄筋コンクリート壁のひびわれ制御に関する2, 3の考察，
土木学会年次講演概要集，pp.255-256，昭53
- (70) B.P. Hughes, Design to BS 5337 for Controlled Cracking of Water
Retaining Structures, The Structure Engineer, Vol.54, pp.383-386,
Vol.55, pp.115-124, pp.125-131, Oct. 1976, March 1977
- (71) C.D.Turton : To crack or to crack?, Concrete, pp.32-36, Nov.1974

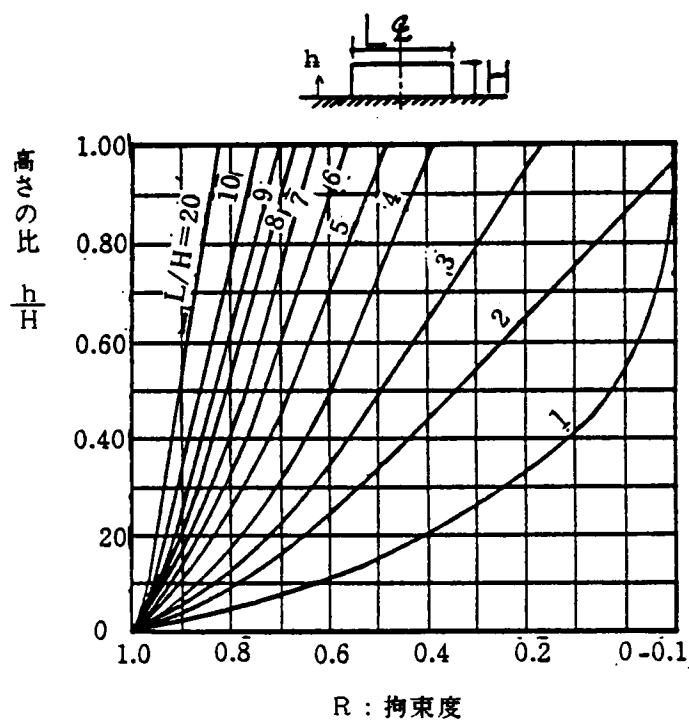


図-2.1 拘束度の高さ方向分布 (ACI)

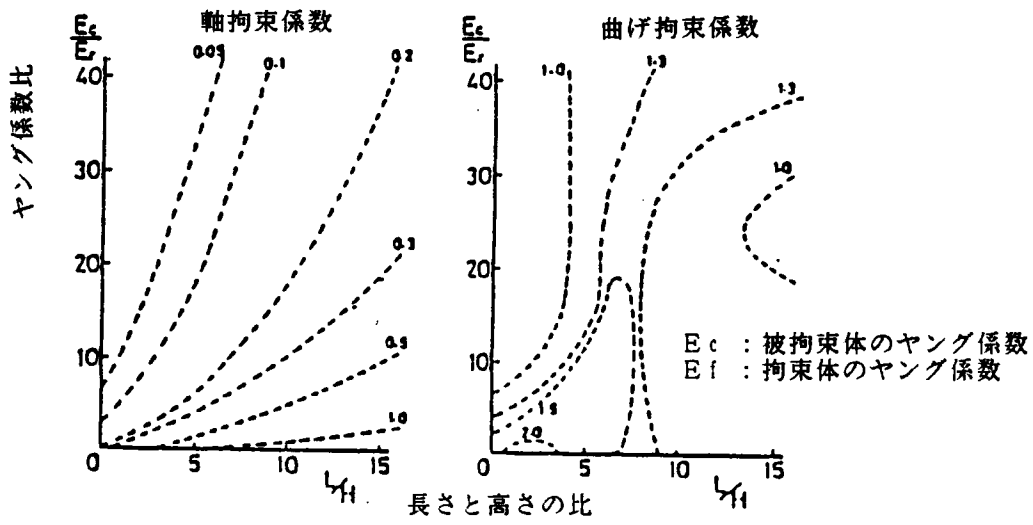


図-2.2 外部拘束係数 (JCI, 温度応力研究委員会)

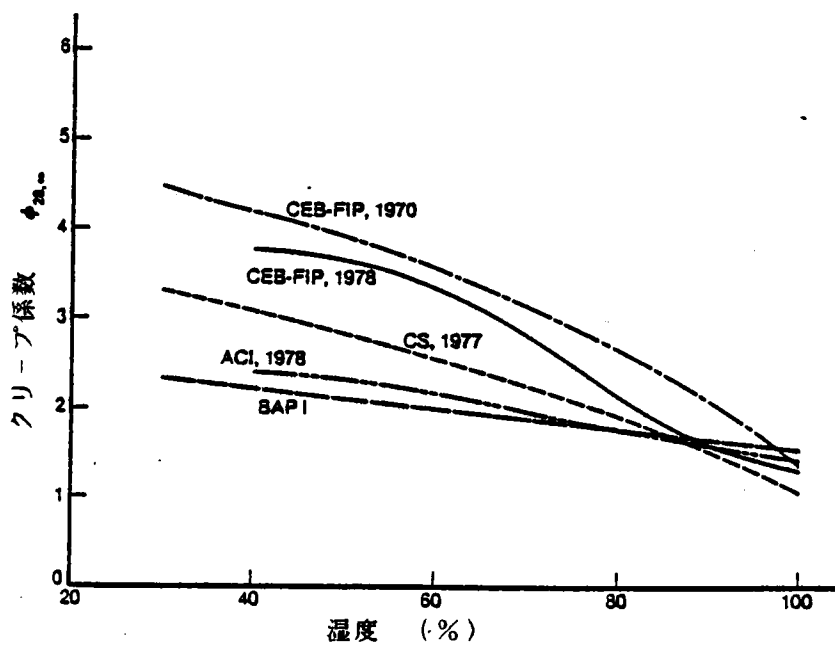


図-2.3 クリープに与える湿度の影響 (Neville)

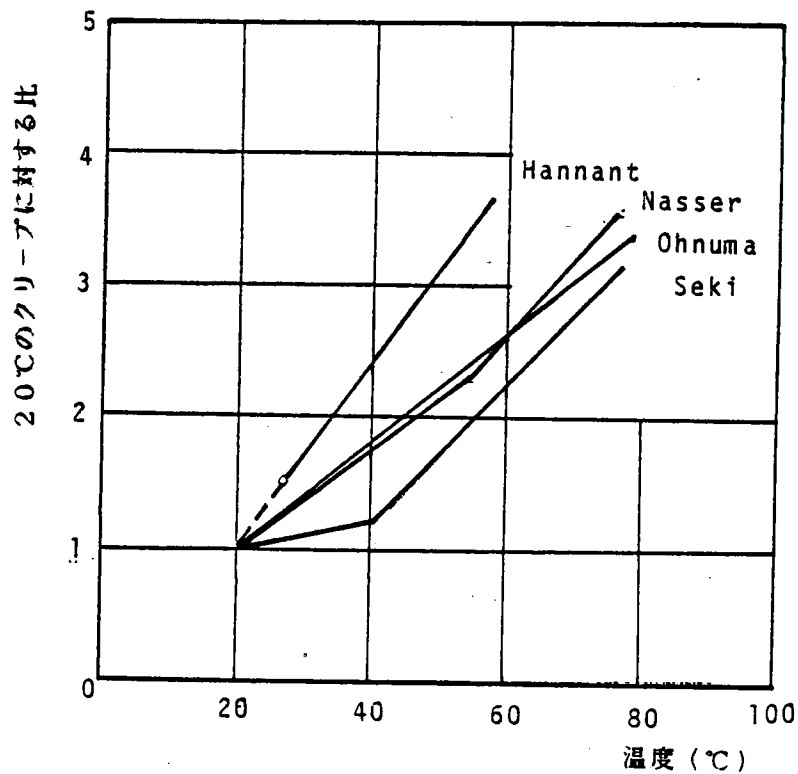


図-2.4 クリープに与える温度の影響

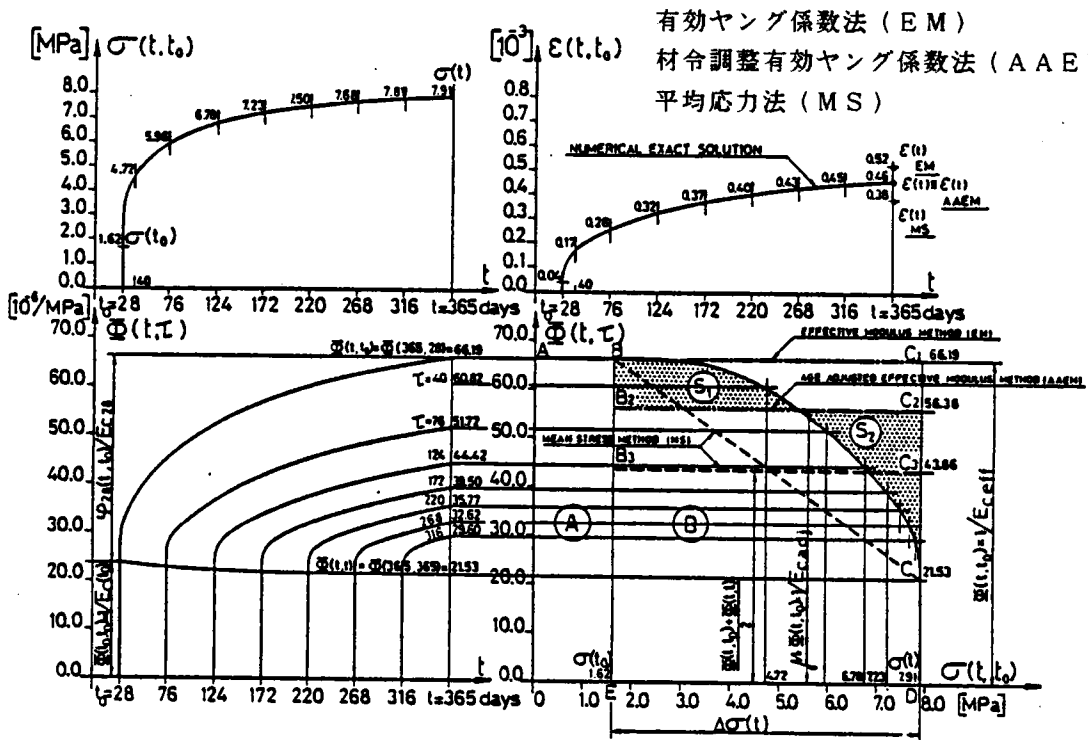


図-2.5 算定方法によるクリープひずみの差

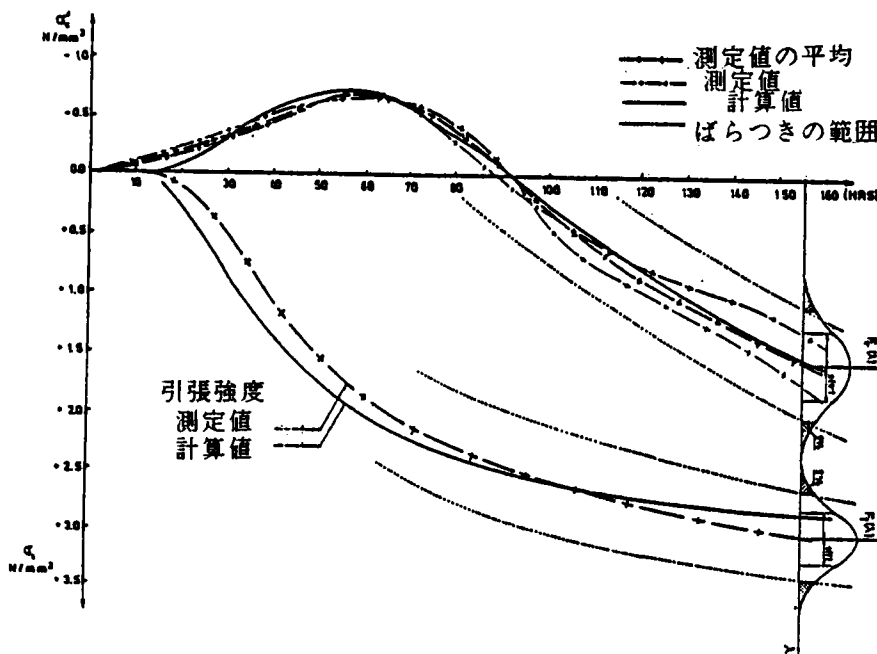
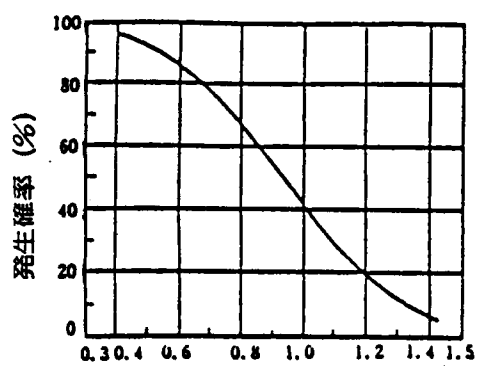
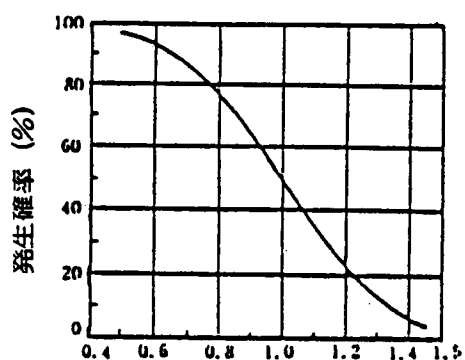


図-2.6 ひびわれ発生に対する確率的評価



内部拘束に対する安全率



外部拘束に対する安全率

図-2.7 ひびわれ発生確率と計算値の関係

3.1 研究目的

マスコンクリートの外部拘束応力を求める場合に重要な要素である拘束度を与える被拘束体、拘束体のヤング係数、形状寸法、界面の付着特性等の影響について、解析的研究が古くから行われている。Zanger⁽¹⁾、森⁽²⁾、川本⁽²⁾らの基本的な研究に始まるものであるが、有限要素法、境界要素法の優れた解析法の開発とコンピュータの著しい進歩を見、複雑な系の解析が可能となった現在においても、なお広く使われている。これは、個々には上記の新しい手法が用いられているものの、拘束度に関する研究が系統的には整理されていない事によるものである。

しかし、最近の研究において、初期の研究、例えばZangerらの成果を基にしたACI 207委員会の算定式には⁽³⁾、拘束体の高さ H と長さ L の比、 H/L が考慮されていず、場合によってはかなり異なった解析結果を与える事が第2章に示したように指摘されている。

以上の事から、本章では、マスコンクリートの基本的な拘束系に対して、改めて解析を行い、拘束度について整理するとともに、従来の提案の問題点を指摘する事を目的とした。

3.2節では、半無限地盤上に打設されたマスコンクリートブロックの拘束応力を有限要素法により求め、拘束度を与えるヤング係数比、 H/L の影響を明らかにし、算定法に考察を加えた。

また、3.3節においては、ダムのブロック打設や、壁体の打上げを想定した場合のモデルについて解析し、既設コンクリートの拘束有効面積や、拘束特性を明確にする事を行った。

これらの各節で、 H/L の影響が大きいことが明確となったため、従来の算定法に、 H/L を含ませ、対策の1つとして重要な打設ブロックの決定に役立つ拘束度算定方法を提案することを試みた。

3. 2 半無限地盤上のマスコンクリートブロックの拘束度に関する研究

3. 2. 1 ヤング係数比の影響に関する検討

(1) 解析方法

最も基本的な問題である半無限地盤上に矩形の構造物が打設された場合について解析を行う。

解析は有限要素法により行った。図-3. 1に解析に用いたモデルおよび要素分割をしめす。

従来の研究においては、半無限地盤寸法が、高さ、長さとも過少にすぎると思われることから、本解析では、被拘束体の高さ(h) 1.5 m 、長さ(l) 24 m に対し、地盤の深さ(H)を 50 m 、長さ(L)を 100 m と十分大きくした。

ここでは地盤のヤング係数(E_f)を $10 \times 10^4\text{ kg/cm}^2$ 一定とし、被拘束体のヤング係数(E_g)を $E_g/E_f = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の4種類に変化させ、被拘束体に一樣に $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ の温度変化が生じたときの応力を求めることとした。

また底面においては鉛直方向の、側面では水平方向の変位を、各々拘束することとした。解析は平面応力状態で行った。

(2) 解析結果および考察

応力解析結果のうち、鉛直ひびわれの原因となる中央断面における水平応力 σ_x の分布を図-3. 2に示す。本解析では $l/h = 16$ と比較的大きいことから、被拘束体内での応力分布は、ほぼ一樣となっていることがわかる。ブロック底面での応力 σ_x から次式で拘束度が求めることができる。

$$\sigma_x = R \alpha E_g \Delta T \quad \dots\dots\dots (3. 1)$$

R と E_g/E_f の関係を示したものを図-3. 3にしめす。図より R は E_g/E_f に逆比例する傾向が認められる。すなわち、次式

$$R = 1 / \left(1 + \frac{E_g}{\alpha_r E_f} \right) \quad \dots\dots\dots (3. 2)$$

近似できることがわかる。

ここに α_r は定数であるが、弾性的拘束条件下では、ブロックの断面積を1とした時の地盤の拘束面積を表すことになる。

本解析の場合には $\alpha_r = 4.65$ でよい一致を示している。(3. 2)式が適用できることは、剛性が $4.65 E_f$ のバネによって、剛性 E_g のコンクリ

トの熱変形が拘束された場合の応力が(3.1)式で与えられることを示している。この点に着目して、マスコンクリートの応力解析法として発展させたものは、第5章に述べる。この意味で(3.2)式は、非常に重要な意義を有している。

図中には、ACI 207 委員会で採用されている Zanger, Brahtz の式を示す。これより明らかなように、同一のヤング係数比 κ に対して拘束度が相当異なつた値になっている。森は $h/l \gg 1$ の場合に ACI 式と同じ式となることを認めている。従って ACI 式は比較的高さの大きいブロックの解析を、あらゆる h/l に適用しようとしたものであるといえる。

h/l の影響については次項にさらに詳しく述べるが、一般には h/l が小さい場合が多いので、ACI 式などにみられる拘束体の有効面積を被拘束体のそれの2.5倍とすることは、相当危険側の設定となっている場合が多いことに留意する必要がある。

3.2.2 高さ、長さ比(h/l)の影響に関する検討

(1) 解析方法

さき に用いた解析モデルと基本的には同じであるが、 $E_g/E_f = 1.5$ および l は $2.4m$ 一定とし、高さ h を $1m \sim 8m$ にまで、すなわち $l/h = 4, 8, 16, 32$ と4段階に変化させた場合について、有限要素法による応力解析を行った。この解析においても地盤の深さは $50m$ とした。すなわち最も h が大きい場合でも、その6倍以上の深さを設定した。

また3次元となった場合の拘束度について考察するため、 $l/h = 16$ については、軸対称回転体としての解析をも行った。

(2) 解析結果および考察

拘束体に生じた σ_x の分布を図-3.4 に示す。本図より、 l/h が8以上であれば、拘束応力はほぼ一様に分布するとみなしてもよいことがわかる。底面の応力を1.0としたときの応力分布は、ACI 207 委員会で与えられている図とはほぼ一致している。

底面の拘束応力は、完全に拘束された場合に 15 kg/cm^2 となるが、 l/h によって相当に異なり、拘束度は $0.5 \sim 0.9$ の範囲となっている。Rが l/h に影響される事は多くの文献で指摘されているが、本解析結果でも、その影響が極めて大きい事を示している。

(1)と同様 (3.2)式における α_r と l/h の 関係を図 3.5 に示す。また、地盤内に生じた応力の分布を 図-3.6 に示す。

これらより (1)地盤内に生じる影響範囲は深さと共に急減するが、およそ l と同じ深さにまで達すること、(2) l/h が大きいほど減衰が小さく有効な影響面積が大きくなること、(3) α_r が2.5となるのは l/h が

約8であり、 l/h に比例して α_r が大きくなることなどがわかる。

(1)からは、応力の伝播深さ、すなわち、地盤内に生じる応力球根の深さは、ブロックの長さ l で一意的に決定されると思われる。 l/h は、この範囲内での応力勾配に大きな影響を与えるものであるといえる。

また、従来 A C I 式などにおいて l/h にかかわらず $\alpha_r = 2.5$ としていた方法に代り、 l/h の影響を加味すべきであり、 α_r は次に示すような l/h の関数として表示することができることが明らかである。

$$\alpha_r = 0.33 l/h \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

また、ヤング係数比 κ の変化に対しても(3.2)式が適用できるとすると

$$R = 1 / (1 + 3 h \kappa / l) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

で、拘束度を表すことができる。

従来、ダムなどにおいては l/h を減少することにより、ひびわれも発生しにくくなり、ブロック長にある制限を設けていたが、このことの妥当性を立証している。(3.4)式はブロック長が、ひびわれの制御効果に与える影響に対して定量的な評価尺度をあたえるものといえる。(3.4)式を図化したものを図3.7に示す。

永山らも、⁽⁵⁾ l/h の影響の大きいことを示すと共に、広範囲な応力解析から R と E_g/E_f 、 l/h の関係を図-3.8に示すように与えているが、本解析結果とも、解析を行った $E_g/E_f = 1.5$ において比較的よい一致を示しており、すぐれた算定図表であると思われる。

(3.4)式は l/h が ∞ になると、拘束度が1.0に近づくことを表している。小野も同様の解析で、このことを示しているが、⁽⁶⁾被拘束体の高さが大きい場合には、先述のように伝播深さに比べて拘束地盤が浅い解析であるために、適用性については若干問題があるものと考えられる。

図-3.4中に、 $l/h = 16$ の場合、軸対称回転体として解析した場合の応力分布を示した。2次元の最大応力に対して 約25%大きい応力が発生している。これを α_r でしめすと、2次元で4.65であるのに対し、3次元では20.6となっており、拘束体直下の地盤だけでなく、周辺にも、拘束応力球根が広がっていることを示している。

マスコンクリートブロックの大きさは有限であることから、現実の拘束系は常に3次元的に取扱う必要があり、上述の2次元の場合の拘束度でも、なお、危険側の推定であることを認識して、解析や対策の立案を行う必要があることがわかる。⁽⁷⁾

3. 3 同幅の拘束体上に打設されたブロックの拘束度に関する研究

(1) 解析条件

図-3. 9 (a) に示すように半無限地盤上に、長さ l 、高さ h のコンクリートブロックが打ち重ねられる場合、打設ブロックが温度変化 (10°C) を生じたときの拘束度について検討する。このため $l = 24\text{ m}$ 、一層の厚さ h を 1.5 m とし、7リフトまで打ち重ねた場合の応力を有限要素法により求めた。3. 2と同様、半無限地盤は深さ 50 m 、幅 100 m と十分大きくした。ヤング係数は、地盤、既設コンクリートおよび被拘束体である新しく打設されるブロックに対し、各々 10×10^4 、 25×10^4 および $15 \times 10^4\text{ kg/cm}^2$ とした。

また 3. 9 (b) に示すように同幅の地盤の拘束が無視できる高さまで打設された既設コンクリート上に打設されるブロックの高さが拘束度を与える影響について考察するため、上記のセリフト目の高さを、 0.75 、 1.5 、 3 、 6 m に ($l/h = 32$ 、 16 、 8 、 4) 変化させた応力解析を行った。

(2) 解析結果および考察

図-3. 10 に各リフトにおける水平方向応力分布を示す。1～3リフトにおいては、地盤よりも既設コンクリートのヤング係数の方が大きいために、拘束応力は次第に大きくなっているが、4リフト以上では、ほぼ一定値となっている。

図-3. 11 は拘束体の応力分布を示したものであり、本図からも5リフト以上の打設による地盤の応力は極めて小さくなっていることが分る。本解析では、地盤のヤング係数を $10 \times 10^4\text{ kg/cm}^2$ としているが、通常みられる岩盤でもかなり大きいものに相当することから、このような積層打設では3～4リフト以上では地盤の拘束の影響は無視してよいものと思われる。地盤、既設コンクリートの有効面積、ヤング係数をそれぞれについて、 $A_f E_f$ 、および $A_1 E_1$ としたとき、両者による拘束を受けた場合の軸剛性から求められる拘束度は次式で与えられる。

$$R = \frac{1}{1 + A_g E_g / (A_1 E_1 + A_f E_f)} \quad \dots\dots\dots (3. 5)$$

図-3. 10 においての底面における σ_x から R を求め、ヤング係数を代入すると共に、1リフトでは $A_1 = 0$ 、2リフトでは $A_1 = 1.5\text{ m}$ 、3リフトでは $A_1 = 3\text{ m}$ とすると、図-3. 12 に示すように拘束体の有効面積を求めることができる。上述のように3リフト以上では地盤の有効面積が零となると共に、4リフト以上では既設リフトの A_f は約 3.5 m 、すなわち打設リフトの 2.33 倍が有効域となっていることがわかる。半無限地盤では

同じ l/h に対して 4.7 であったことから、同一幅を有する拘束体では、ほぼ半減すると考えてよい。

次に、第7リフトにおいて高さを $0.75m \sim 6m$ まで4種に変化させたときの、被拘束体および拘束体の応力分布をそれぞれ 図 3.13 および 図 3.14 にしめす。

これらより、半無限地盤上と同様 (1) 応力の伝播深さは l/h な影響されず、約 $7m$ (長さの約 30%) であること、(2) ほぼ直線的に拘束体の応力が減少すること、(3) 拘束応力は打設ブロックの l/h によって異なることがわかる。

森は h が大きい場合、拘束度を次式で与えている。

$$R = 1 / (1 + \kappa^{0.7}) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

ここで行った解析では $\kappa = 15 / 25 = 0.6$ であるので、(3.6) 式によると拘束度は 0.6 となり、これは $l/h = 4 \sim 8$ の場合に相当する。

ダムでは通常、 $h = 1.5m$ 、 $l = 15m$ と採られることが多く、このほかの構造体の施工でも一般に、 l/h は 4 よりも大きいので、(3.6) 式による応力算定は危険側の評価となるものと思われる。

図-3.15 には 3.2 で述べた半無限体の場合と、本節の同幅を有する場合の l/h と拘束有効面積比の関係をを示す。、後者の有効面積比は前者の約半分となることを示している。

同幅の拘束体に対しても (3.2) 式が適用できるものとすれば、拘束度 R は次式で与えられる。

$$R = 1 / (1 + 6.7 \kappa h / l) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

図で求める場合には、実際の l/h の半分の値を 図-3.5 における l/h とすればよい。

ここで求めた (3.7) 式と、森および小野の計算結果と比較したものを 表-3.1 に示す。この表より κ が 1 より小さい場合には、これらと比較的良好適合性を示している。一般に積層打設を行う場合にも、応力評価の対象とするのは、打設ブロックのヤング係数の方が小さい硬化過程であるので (3.7) 式はダムやベースマット状コンクリートに対して有効に適用できるものと思われる。

このことは、半無限地盤上の場合と同様、同幅のブロックを積層打設する時にも、弾性バネによる解析が可能である事を示している。

3. 4 結語

有限要素法を用いて、拘束度について基本的な検討を加えた結果、次の様な結果と、拘束度の計算方法が得られた。

- (1) 半無限地盤上で矩形コンクリートブロックが打設された場合に生じる底面の最大拘束度は、ブロックと地盤のヤング係数比 κ の分数式で示される。このことは、地盤を弾性バネとし、これがコンクリートの熱変形を拘束する場合に表れる拘束度と等価である。
- (2) 地盤が拘束に寄与する有効断面積は、ブロックの長さ l と高さ h の比 (l/h) に影響され、比例して大きくなる。従って、拘束度も l/h によって変化する。ACI 207 委員会式はこの意味で問題があり、一般には危険側の評価を与えることが多い。

- (3) 解析結果から算定式として次式を提案できた。

$$R = 1 / (1 + 3\kappa h / l)$$

本式からも明らかなように、長さが大きい打設ブロックでは拘束度 1 に近づく。また、この式には、マスコンクリートのブロック形状を含んでいるので、対策の一つとしてブロック長を検討する場合に有効に用いることができる。

- (4) 半無限地盤上に有限幅のブロックが打設された場合、周辺を含む3次元的な拘束状態となるため、拘束度はかなり大きくなることに留意しなければならない。
- (5) 半無限地盤上に、同幅のコンクリートブロックが打ち重ねられてゆく、ダムや大型ベースマットを対象とした解析をおこなった。この結果、地盤のヤング係数が小さい場合には、4リフト程度では、地盤の影響を無視してよいことが明らかとなった。
- (6) 半無限の拘束体に比べ、同幅の拘束体では拘束の有効面積がほぼ半減するとみなしてもよい。
- (7) この場合においても打設ブロックの形状 (h/l) の拘束度を与える影響は大きく、 h/l が4以上では、森の提案式は危険側の評価となると思われた。

(8) 同幅の拘束体が存在するときの拘束度は次式で与えることができる

$$R = 1 / (1 + 6.7 \kappa h / l)$$

本式は K が 1 よりも小さい範囲において、既往の研究結果とよい一致を示した。

【参考文献】

- (1) 森：一辺が拘束された三角形ならびに四角形板の熱応力と拘束度について，
土木学会論文集，第89号，pp.45-53，昭和38.1
- (2) 川本：マッシブな構造物の収縮応力に関する光弾性学的研究，土木学会論
文集，第61号，pp.29-38，昭和34.3
- (3) ACI 207 Committee: Prediction of creep, Shrinkage and Temperature
Effects in Concrete Structures, ACI Oct. 1978
- (4) 田辺他：マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンク
リートの外部拘束効果，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関
するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，1982.8, pp. 83-90
- (5) 永山，矢沢：コンクリートダムの温度応力解析，土木技術資料，22-9，
pp. 26-32, 1980
- (6) 小野他：マスコンクリートの外部拘束度に関する一考察，土木学会年次
公開概要集，pp.45-46, 1981
- (7) 梅原他：発電所基礎マットにおける温度応力の実測とその三次元解析，
マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，
日本コンクリート工学協会，1982.8 pp.65-72

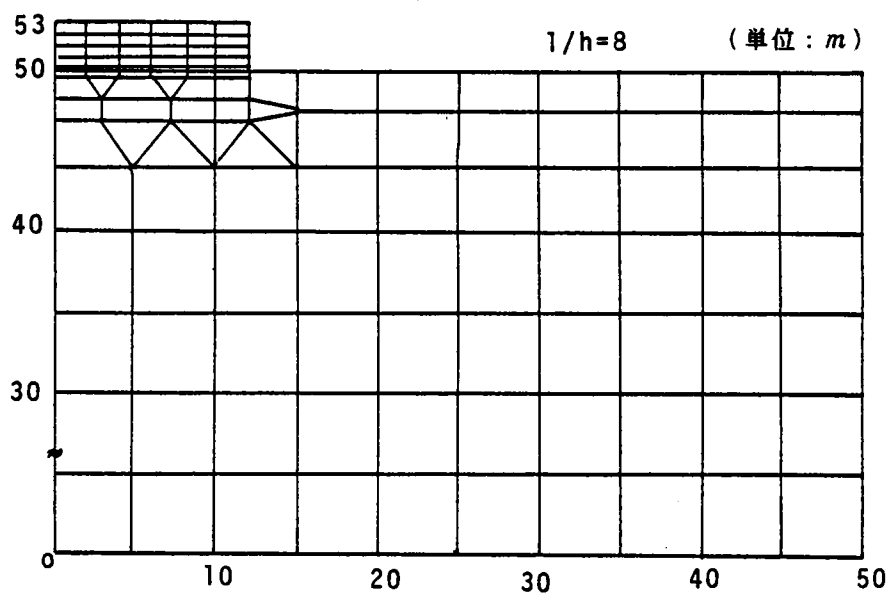


図-3.1 解析モデルと要素分割

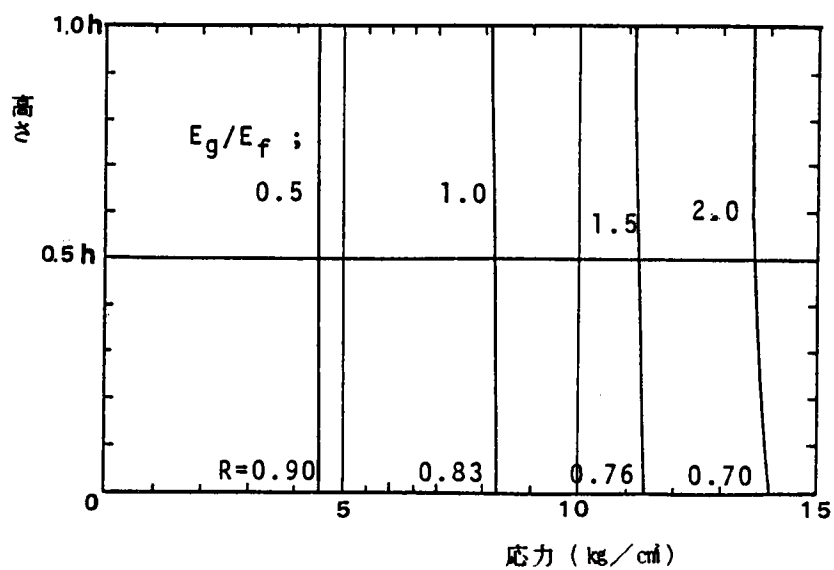


図-3.2 ヤング係数比と応力分布の関係

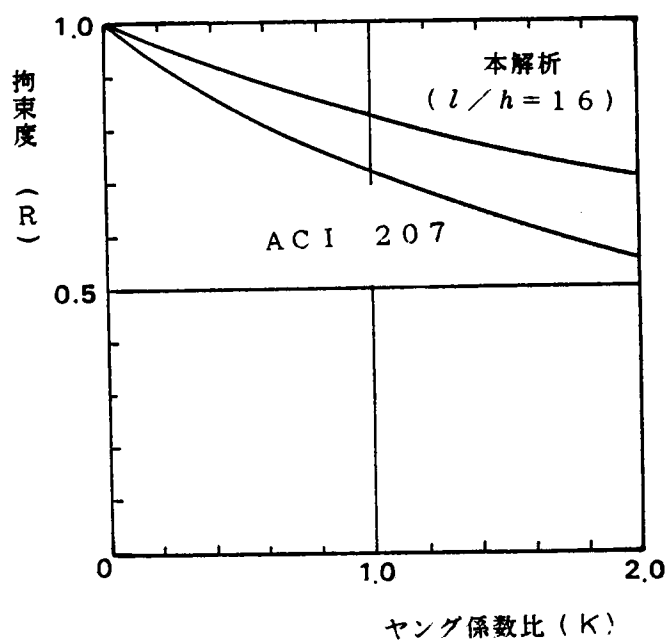


図-3.3 ヤング係数比と拘束度の関係

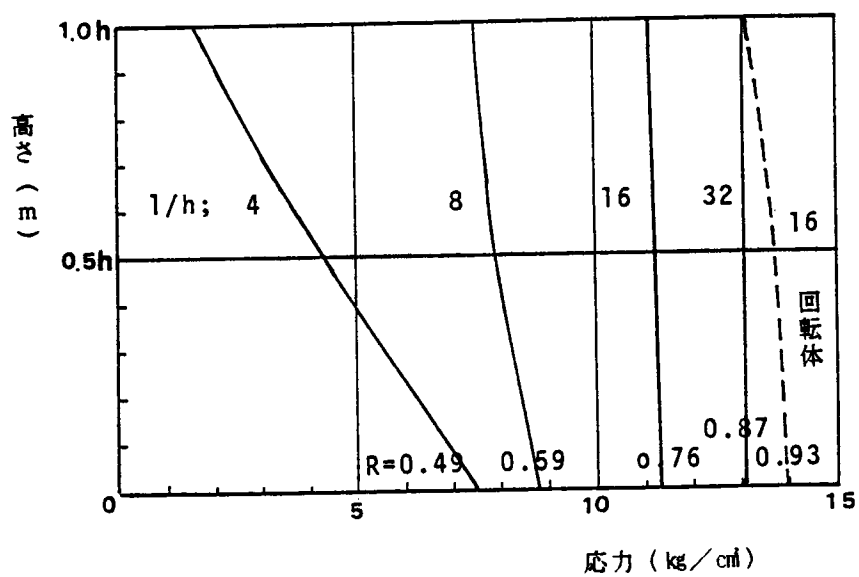


図-3.4 l/h と応力分布の関係

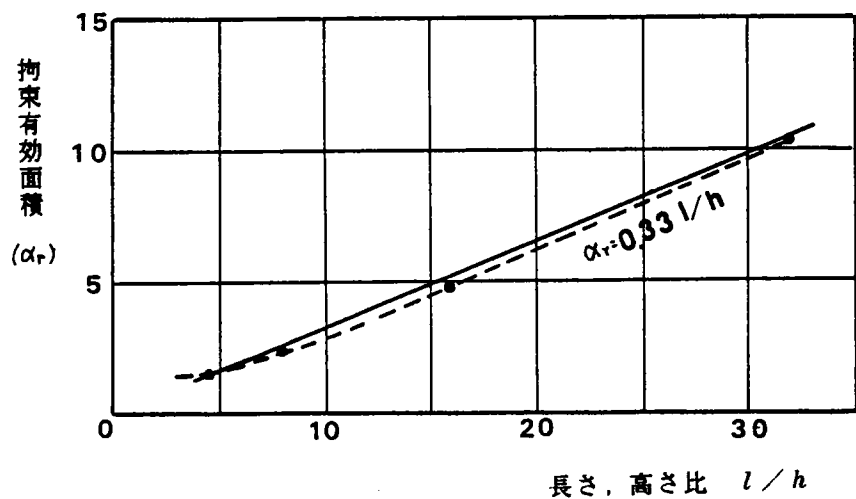


図-3.5 α_r と l/h の関係

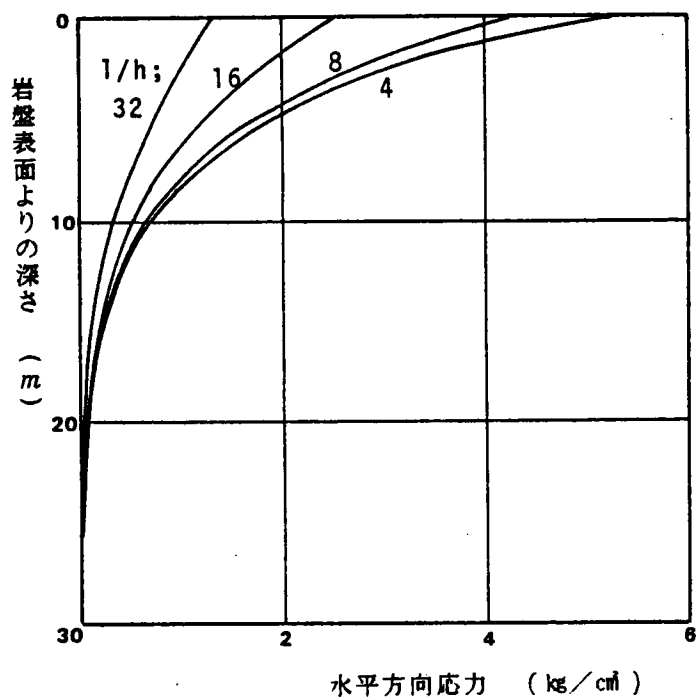


図-3.6 地盤内の応力分布

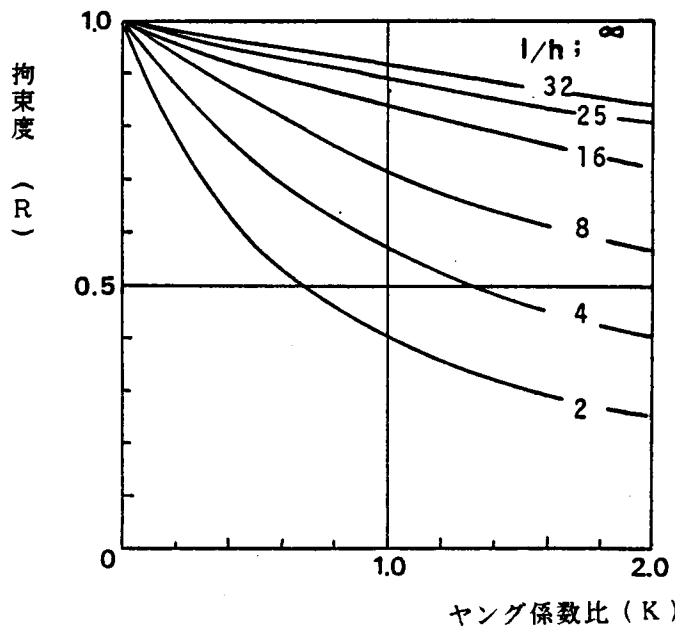


図-3.7 l/h をパラメータとしたときの拘束度とヤング係数比の関係

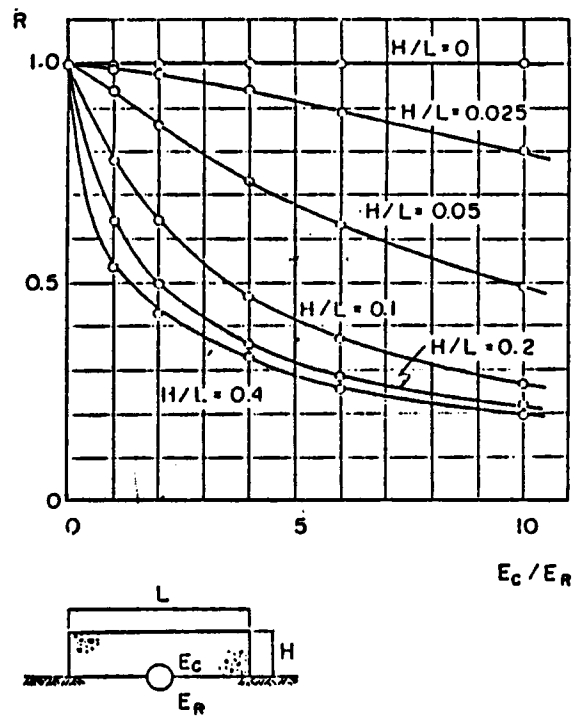


図-3.8 永山らによる拘束度とヤング係数比の関係

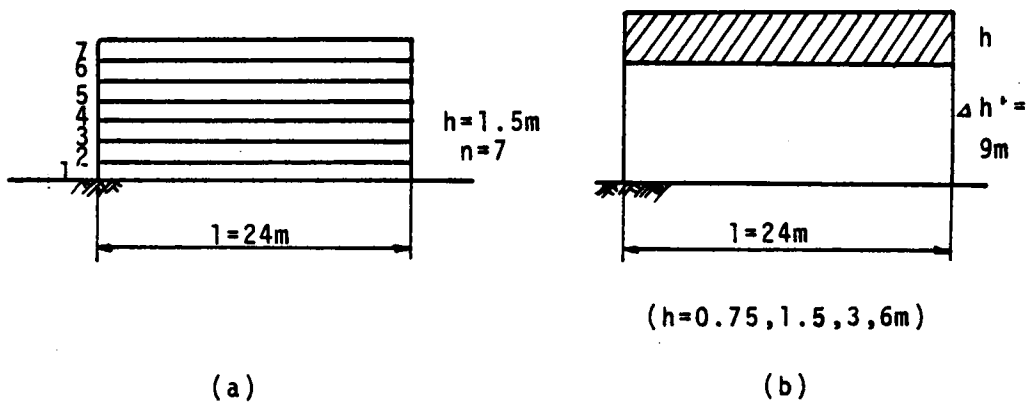


図-3.9 解析モデル

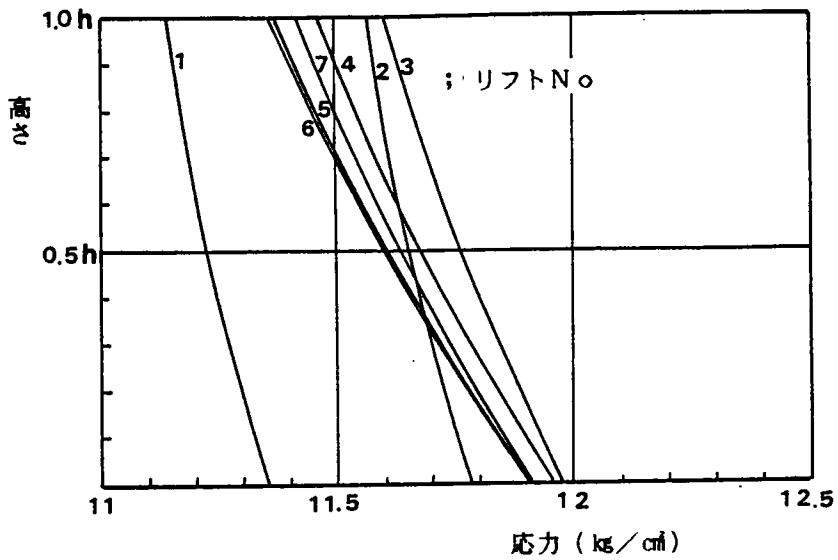


図-3.10 各ブロック内の水平方向応力分布

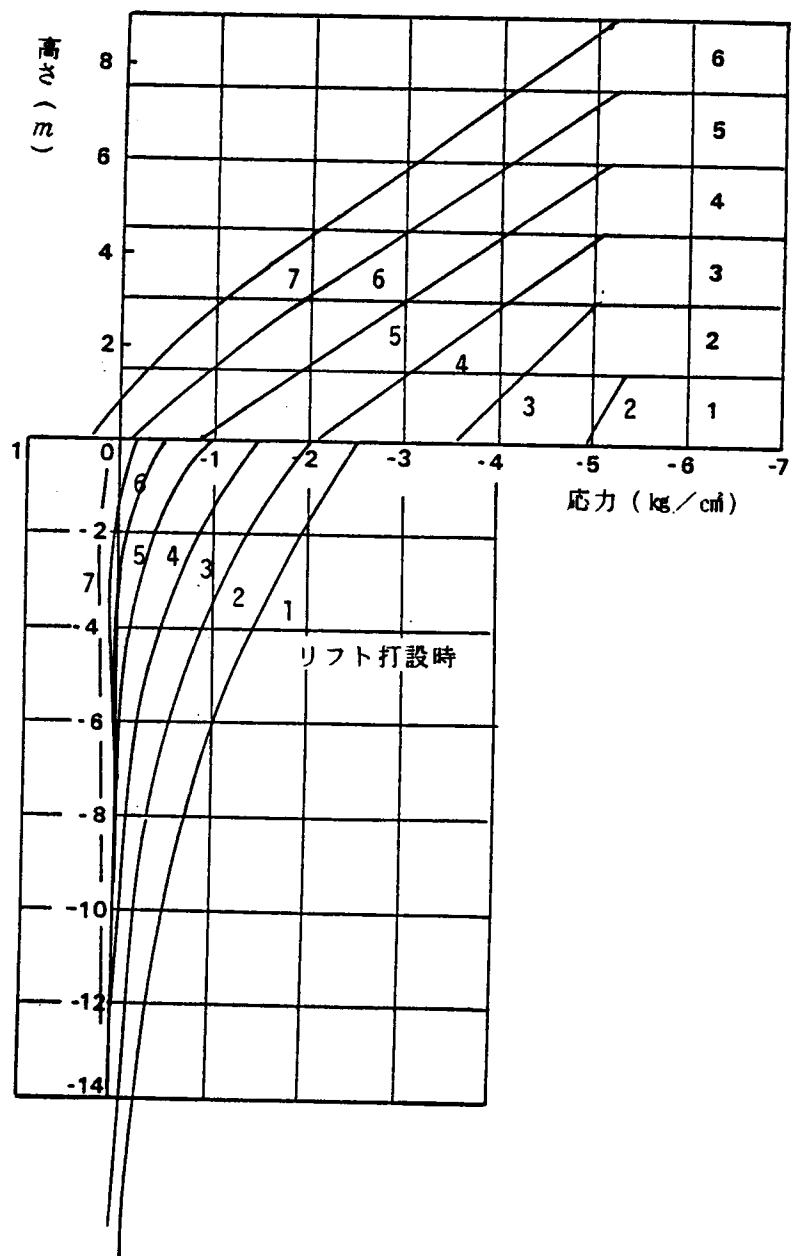


図-3.11 拘束体内の応力分布

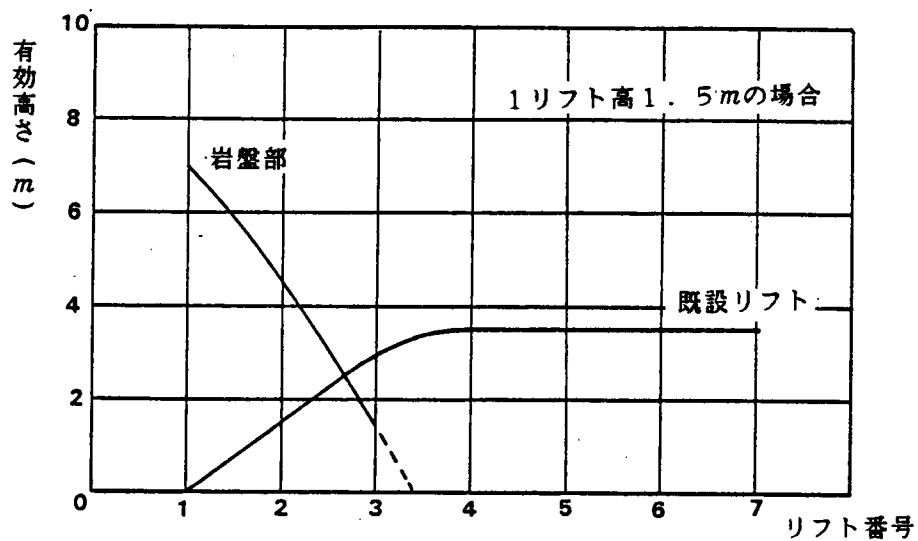


図-3.12 各リフトの拘束に關与する地盤，
既設リフトの拘束有効面積（高さ）

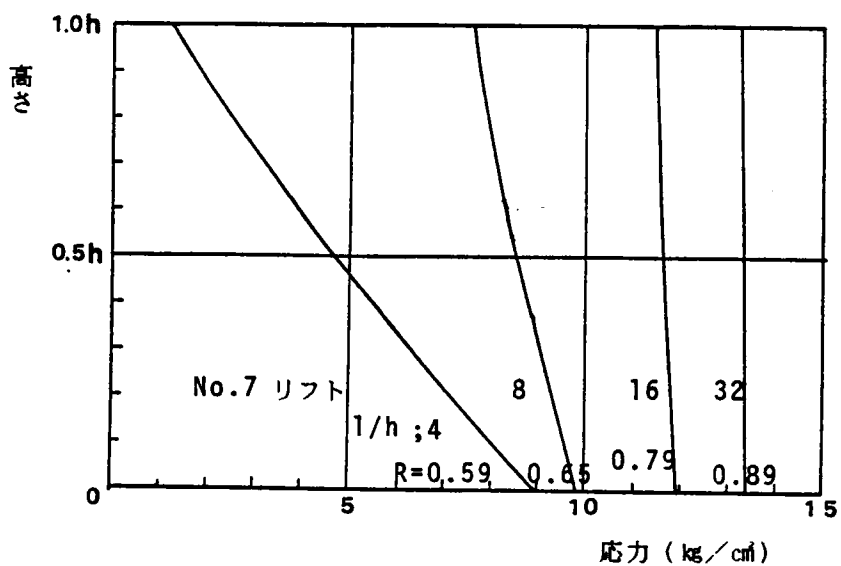


図-3.13 第7リフトの高さを変えたときの応力分布

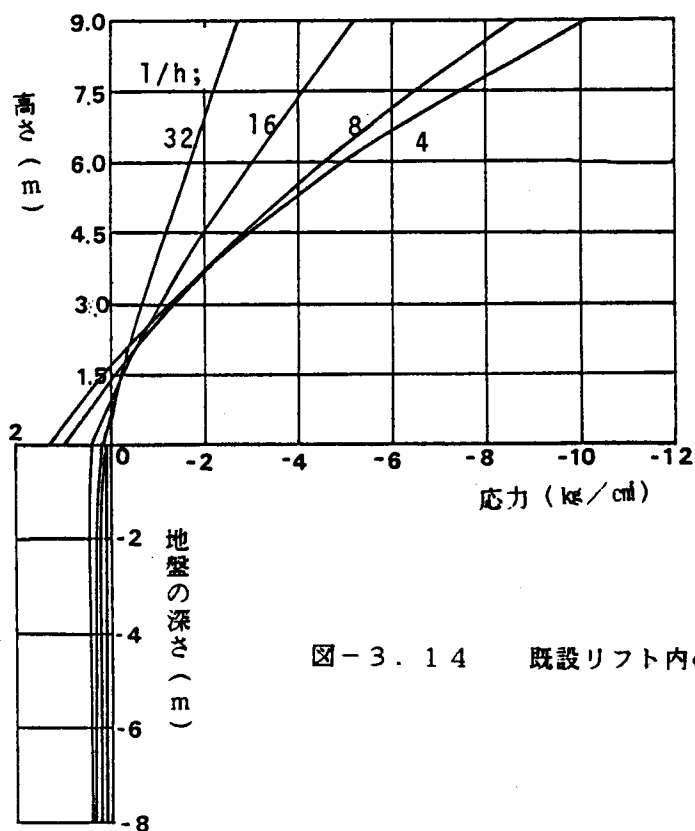


図-3.14 既設リフト内の応力分布

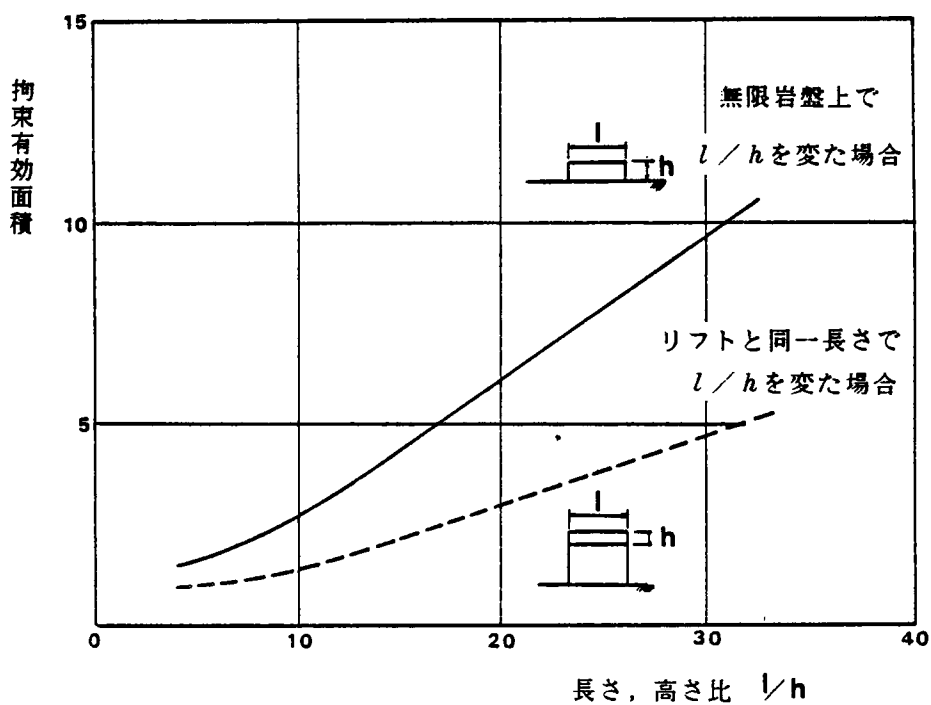


図-3.15 拘束有効面積と打設リフトの l/h の関係

表-3.1 (3.6)式と森, 小野の結果との比較

K	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	4.0
森式	0.75	0.66	0.59	0.53	0.50	0.20
(3.6)式 $l/h=5.8$	0.81	0.68	0.59	0.52	0.46	0.11

	K L/H	0.5	0.8	1.0
小 野	20	0.91	0.88	0.82
	10	0.76	0.65	0.60
(3.6) 式	20	0.86	0.78	0.74
	10	0.75	0.65	0.60

第4章 熱応力・ひびわれ発生に及ぼすコンクリートの力学的性質と その影響に関する研究

4.1 研究目的

マスコンクリートに発生する温度応力を推定したり、ひびわれの発生を予測する場合、コンクリートの力学的性質を十分把握し、解析方法に反映することが重要である。第1章で述べたように、これに関連した研究は広く行われているが、初期材令における物性、水和熱による硬化促進の影響等、マスコンクリートに特徴的な点については、十分解明しておく必要がある。

ここでは、まず4.2節において、実構造物と同様の寸法を有するマッシュな部材を製作し、これより採取したコアの力学的性質を調べることによって、躯体内の各特性値の特徴や水和熱の影響、実験室の供試体で得られる特性値との差、解析に取入れる場合の特性値の表現、ひびわれ防止上の配慮等について論じることがを目的とした。

4.3節では、多くのクリープに関する研究の中で、比較的研究の不十分な、初期材令のクリープに関する実験を行い、マスコンクリートにおけるクリープの特性を把握するとともに、既往のクリープ予測提案式の適合性の検討を加えることを目的とした。

なお、4.2節は関西電力㈱の委託研究として行ったものに、マスコンクリートのひびわれ予測に必要な考察を加えたものであり、基本的なデータは関西電力に帰属するものである事 ことを付記しておく。

4. 2 マスコンクリート躯体の力学的性質に関する研究

4. 2. 1 実験概要

ベースマットや厚肉壁体を想定したマスコンクリート試験体を製作し、試験体の上下、厚さ、方向毎に採取したコアの圧縮強度、ヤング係数を求め、これらに対する材令、温度履歴、打設方法、沈降分離の影響を明らかにすると共に、管理用小型円柱供試体で求められるこれら特性値との関係を求めた。本実験は冬期、夏期の両時期に行い、水和熱による温度レベルを変化させた。

本実験はマスコンクリート用として中庸熱セメントにフライアッシュを混和した結合剤を用い、かつ流動化コンクリートであることから一般のコンクリートとは、やや異なるが、力学的性質に関する基本的特性は同じであるとの観点から、ここに採りあげた。

4. 2. 2 実験計画および方法

(1) 使用材料

セメントは中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを20%内割混入した中庸熱フライアッシュセメントを用いた。細骨材には、山砂、砕砂の混合砂を、粗骨材は最大寸法25mmの硬質砂岩を母岩をする碎石を用いた。混和剤としてはリグニンスルホン酸塩を主成分とするAE減水剤遅延型のボゾリスNO. 8（日曹マスタービルダーズ社製）をベースコンクリートに用い、流動化剤にはナフタレン系のハイフルード（竹本油脂製）を使用した。

セメントおよび骨材の試験結果を表-4. 1、4. 2 に示す。

(2) コンクリートの配合および製造方法

冬期および夏期の実験に用いたコンクリートの配合は表-4. 3に示す通りであり、両コンクリートとも水セメント比は50%とした。コンクリートの練り混ぜには2軸強制練りミキサー（容量3m³）を有するバッチャープラントにて行った。コンクリートの運搬にはアジテート車（5. 5m³）を用い、練り混ぜ開始後30分に流動化剤を添加し、15分間高速攪はんの上、コンクリートの打設を行った。

(3) 試験体

マスコンクリート模擬試験体として、厚さ（リフト厚）2. 0mのベースマット、壁厚1. 0m、高さ3. 0mの厚肉壁体の2種を作製した。

また温度上昇の少ない厚さ30cm、高さ3. 0mの薄肉壁体をも比較用に同時に

作製した。これらの試験体ではベースマットおよび壁体に相当するように、側面は厚さ20cmの発泡スチロール製断熱材を貼布した。またいずれの試験体においても乾燥の影響を除去するために、全面に脱型直後から防水シートを貼布した。これらの試験体の形状、寸法を図-4.1に示す。

管理用供試体(φ10×20cm)を模擬試験体打設時に作製したが、養生方法は表-4.4に示すように計10種とした。表中、マスコンクリート温度履歴は、ベースマットおよび厚肉壁体中心部の温度と同様の温度履歴を与えるように、検出、制御、加熱装置を有する温度制御水槽を用いて養生したものである。

(4) コア採取位置を 図-4.1中に示す。コア径は φ10cmであり、材令28日、91日において水平方向にも採取した。採取にあたっては周速、送り速度を一定に保つと共に、採取後、試験までの乾燥を防ぐなどの注意を払ったが、一般には変動が大きいことから、同一要因のコア本数は 4本とした。

各試験体には 図中 に示すように、銅-コンスタンタン熱電対を埋設し、コア試験体の受けた温度履歴が求まるように温度測定を行った。

コアおよび管理用試験体に対して、JISA-1107およびA-1108に従って圧縮強度試験、およびヤング係数の測定を行った。

4.2.3 結果および考察

(1) 供試体強度

表-4.5に、冬期および夏期に打設したコンクリートの20℃標準水中養生を行った管理用供試体の圧縮強度を示す。各時期において流動化剤を添加する前のベースコンクリートの強度と流動化コンクリートとの強度には差がないことが分る。

一方、冬期では夏期に比べて材令28日で約30kg/cm²、91日で約90kg/cm²高い強度となっていることが認められる。使用セメントの特性に大差が認められないこと、いずれも同一の水セメント比であることから、この差は基本的には練り上り温度(冬期 7℃、夏期 26℃)の影響によるものと考えられる。

このような傾向は多くの研究でも認められており、熱応力解析用特性値の推定にあたっては、単に積算温度の関数で表すことには無理があるものと思われ、練り上り温度を加味する必要があることを示唆している。

ここでは定量的に論じるに十分なデータはないが、解析用特性値は、使用する材料、調合は当然であるが、練り上り温度をも実際の条件に合せて試し練り実験によって求めるべきであろう。

(2) 温度履歴 および積算温度

各試験体中心部の温度履歴測定結果を図-4. 2に示す。夏期では、冬期に比べ、温度上昇量が大きいのみならず、上昇、降下速度も大きく、ひびわれ発生にとっては不利であることがうかがえる。なお、差分法による温度推定値と実測値は比較的良い一致をみており、熱的定数の設定を実験データに基づいて合理的に設定すれば、温度の推定については、大きな問題がないことが、本実験によっても確認された。

(3) 躯体強度に及ぼす各種要因の影響

図-4. 3に各模擬試験体から採取したコア供試体および各種養生を行った管理用供試体の圧縮強度試験結果を示す。この結果を用いて強度に与える要因について考察を加える。

(a) 沈降分離の影響

図-4. 4は水和熱による温度上昇がほとんどみられなかった厚さ30cmの薄肉壁体の強度を、打ち上り面からの深さ方向分布として表したものである。打ち込み高さ2m、3m、夏期、冬期のいずれの場合においても、打ち込み面から30～80cmの深さにおいては、下部に比較すると10～20%の有意な強度低下がみられた。

この原因を明らかにするため、高さ3mの試験体から、ブリージング および凝結が大部分終了した直後に、高さ方向6ヵ所から、コンクリートを採取し、塩酸溶解熱法によって水セメント比を測定した。この結果、打ち上り面近傍では水セメント比が増加しており、強度分布と相似な分布がみられた。このことから、頂部の強度低下はブリージングが主原因であると推定される。

以上の事より (1) マスコンクリートにおいては、初期に内部拘束応力が、外表面で最大となり、かつ温度上昇による強度促進も小さいことからブリージングの少ないスランプの小さいコンクリートを用いること、(2) 打ち上り面の保温養生が極めて重要であること、(3) 打ち上り面に内部拘束応力によってひびわれの危険性がある場合、引張強度は通常用いる値に対して低減したものをを用いるべきであること（本実験では圧縮強度試験のみしか実施していないが、引張強度が圧縮強度の平方根に比例するとすれば10%程度の低減は必要と思われる。）^(5,6)がわかる。温水養生がひびわれ防止に有効であったとの報告例^(5,6)は、熱応力を緩和すること以外に、このような事象に基づくものであろう。

(B) 温度上昇の影響

図-4. 5は頂部を除く全てのコアについて、積算温度とコア強度との関係を示す。図中の回帰式は、積算温度の対数値と強度とを直線回帰したものであるが、

両者の間には高い相関性が認められ、温度と材令を異にしたコンクリートの強度推定に積算温度を用いることが有効であることが本実験からもわかった。しかし、冬期と夏期では異なった回帰直線となり、前述のように、主として練り上り温度によると思われる影響が顕著に表れている。この原因は、一般には、初期にセメント粒の表面の水和が急激に進行するため、長期には、未水和部分が残留するためと定性的には説明されており、蒸気養生などの促進養生にみられる現象と同種のものと考えられる。

この影響を定量的に表現することは、材料によっても異なることから、現状では困難であるが、練り上り温度に則した積算温度と強度の関係式を解析に用いるべきと考えられる。

図-4.6は、コア強度と強度の $1/3$ 割線ヤング係数の関係を示したものである。この図より明らかなように、ヤング係数は多くの提案式と同様、強度の平方根に比例するとみなせる。すなわち温度応力推定に使用するヤング係数は、圧縮強度を中間のパラメータとして積算温度との関係式で表示することが可能であると思われる。なお本実験の範囲内ではBSI式が比較的よい対応を示した。

本実験は若材期を含んでいないが、硬化直後からの極めて若材令期から、ヤング係数と強度の間に一定の相関関係が認められることは、第6章において述べる。

(C) 管理用供試体強度との対応

図-4.7および4.8は各種の養生を行った管理用供試体の強度と積算温度との関係を冬期、夏期についてそれぞれ示したものである。また、これらの図中には先述のコア試験体から求めた回帰式をも示す。これらより気中養生や養生箱のように、水分逸散のある養生を除けば、いずれの養生法もほぼ同一線上にあり、しかもコアから求めた回帰式とも、夏期の初期を別にすれば一致していることが認められる。

これらの結果から、躯体の強度を温度解析結果から推定する場合、あらかじめ所定の配合で実験室で求めた強度と積算温度の関係式を適用できることを示している。しかも、この場合、マスコンクリートにおいては標準水中養生で関係式を求めても、大きな誤差を生じないことを示唆している。

4. 3 マスコンクリートにおけるクリープに関する研究

4. 3. 1 実験概要

マスコンクリートの応力解析においては、2章において述べたようにプレストレスロスを対象とした研究に比べて特に比較的若材令で載荷した場合のクリープ特性が必要となる。ここでは、載荷時材令を1, 3, 7, 14, 28, 91の6材令に変化させて実験を行い、各種のクリープ構成方程式の妥当性を検討することとした。

対象がマスコンクリートであることから、供試体からの湿分の拡散を防止した状態でのクリープについて試験した。

試験時の温度は20℃とした。載荷した供試体と同一寸法、同一条件でシール養生した無載荷の供試体を用いて自己収縮ひずみを測定し、シールの健全性を確認するために重量変化を測定した。載荷時には、クリープ試験を行った供試体と同一条件でシール、養生した供試体を用いて、圧縮強度、ヤング率を測定した。

4. 3. 2 実験方法

(1) 使用材料および配合

セメント、骨材、混和材料は前節と同じものを用いた。配合は、表-4. 6に示すように、プレストレスコンクリートを対象としたものである。

(2) 供試体

クリープ試験に用いた供試体を 図-4. 9に示す。図中(a)はシール材の剛性がクリープにおよぼす影響を考慮して、厚さ3mmのアチルゴムを用いてシールしたものであり、材令1, 3, 7, 14日で載荷した供試体に用いた。(b)は厚さ0.2mmの銅版でシールしたものであり、材令28, 91日で載荷した供試体に用いた。型枠にシール材およびカールソンひずみ計を設置した後15cmずつの3層に分けてコンクリートを打設し、小型の内部振動機を用いて締め固めた。圧縮強度、ヤング率の測定には、クリープ供試体と同一条件でシールした $\phi 15 \times 30$ cmの円柱供試体を用いた。

(3) 載荷方法

材令1, 3, 7日で載荷した供試体は、図-4. 10(a)に示すように、供試体を直列に2体設置し、コイルバネを用いて載荷した。材令14, 28, 91日で載荷した供試体は(b)に示すように定油圧発生装置に連動した油圧ジャ

ッキにより載荷した。載荷荷重は、圧縮強度の25～30%とした。

(4) 測定方法

クリープひずみ、無載荷供試体の自己収縮ひずみの測定には、検長15cmのコールソン型ひずみ計を使用した。載荷荷重の測定には、図中に示したようにロードセルを使用した。無載荷供試体の重量測定には、感量5gの直示天秤を使用した。ヤング率の測定には、試験前日にシールを外した後、貼付した検長67mmの抵抗線ひずみ計を使用した。ただし、材令1、3日の試験では、試験の直前にシールを外し、ケージタイプの変位計を用いたコンプレッソメーターを使用した。

4.3.3 試験結果と考察

圧縮強度、ヤング率の測定結果を表-4.7に、クリープ試験結果を表-4.8に一覧表で示す。また、クリープ供試体から測定したひずみを載荷応力で除して求めた単位クリープ曲線を対数の時間軸を用いて図-4.11に示す。無載荷供試体の自己収縮ひずみ測定結果を図-4.12に示す。なお、無載荷供試体の重量測定結果では重量変化は全く見られず、シールが完全であったことが確認された。

図-4.12に示したようにコンクリートの自己収縮ひずみは、材令50日ごろまで徐々に増加しており、最終的に約 60×10^{-6} の値を示した。他の研究でも同程度の収縮が報告されている⁽⁷⁾。したがって材令50日以前で載荷したクリープ供試体のひずみ測定値には自己収縮ひずみが含まれており、自己収縮ひずみを補正したものをクリープひずみとしなければならない事が分かった。無載荷供試体二体の自己収縮ひずみの平均値を用いて図-4.11の単位クリープ曲線を補正した。自己収縮ひずみを補正した単位クリープ曲線を図-4.13に示す。これは一載荷材令当たり二体の供試体の平均値を用いて求めたものである。

図-4.11と図-4.13を比較すると、初期の材令で載荷した供試体のクリープひずみ測定値は自己収縮にかなり強く影響されていることがわかる。また図-4.13から単位クリープ曲線は、載荷直後から約300日まで単調に増加しており、特に載荷後1日以降は、ほぼ直線的に増加していることがわかる。載荷後の材令1、7、28、300日における単位クリープひずみと載荷時材令との関係を図-4.14に示す。

この図から、初期材令で載荷した場合の単位クリープひずみが非常に大きく、載荷時の材令が遅くなると単位クリープひずみは、急速に小さくなることが確認される。

図-4.15は、Parrott がまとめた載荷時材令28日を1としたときの相対クリープを示している⁽⁸⁾。

本実験の結果は載荷後28日において、載荷時材令1日で4.5、3日で2.8、7日で2.0、91日で0.6となっており、図中の他の研究者の結果と

ほぼ一致していることがわかる。

図-4.16には各材令で載荷した時の単位クリープ曲線を、載荷材令を横軸にとって示す。この図からは、載荷時材令の異なるコンクリートのクリープについてWhitneyの法則として一般的に知られている近似的な性質、すなわち、材令 t_1 で載荷したクリープ曲線は、材令 t_0 ($t_1 > t_0$) で載荷したクリープ曲線の t_1 以降の部分と等しいとする性質が、厳密には成立しないことを確認できる。しかしながら、解析上の便利さを考えるならば、図より、解には、さほど大きな影響を与えないものと思われる。

先に述べたように、載荷後の材令1日以降の単位クリープひずみが直線的に増加しているため、単位クリープ曲線は

$$\phi(t, t_0) = a \log(t - t_0) + b \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

の形の回帰式で近似できる。各載荷時材令ごとの単位クリープ曲線の回帰式の係数、 a 、 b を表4.9に示す。

また、これらの係数と載荷時材令との関係を求めると次の式が得られた。

$$a = 3.26 (0.493)^{\log t_0} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$b = 4.33 (\log t_0 + 1)^{-2.55} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

これらの基本式はダムコンクリートに対して行った原口らの研究(9)にもほぼ対応している。

次に、クリープ推定式と、2章で述べたCEB-FIP式⁽¹⁰⁾、Bazant式⁽¹²⁾、Neville⁽¹³⁾の式との対比を行ってみる。CEP-FIP式においては、環境湿度の係数を0.8に、仮想厚さを10cmとして部材厚に関する流動係数 $\varphi_f = 1.7$ とした、図-4.17および4.18に、これらの計算値と実測値を対比して示す。

CEB-FIPの式は、28日、91日で載荷した場合は実験値とよく合うが、初期材令で載荷した場合は、実験値よりかなり小さな値を推定している。Bazantの式も載荷材令3日以降は、実験値と比較的よく対応しているが、載荷時材令1日の場合は、実験値よりかなり小さな値を推定している。Nevilleの式は載荷材令28、91日については実験値とよく合っているが、初期材令で載荷するほど、大きな値を推定している。これらの式は、いくつかのデータを統計的に処理しているため、一つの実験例によく適合することは必ずしも期待できないが、いずれも初期の材令で載荷した時の適合性が悪い。これは主としてフライアッシュを混入した中層熱セメントを使用していることによるものと考えられ、この種のセメントを用いたコンクリートの初期材令におけるクリープが大きいことが推定される。すなわち、Bazant式におけるセメント種別に関する係数 a_1 、CEB-FIP式における有効材令算定のための係数 α の採りかたには、ここで用いたセメントに対してはやや無理があるものと思われる。すなわち、 α は普通セメントに対し、1.0、早強セメントで2.0としているが、本実験に用いたセメントが中層熱フライアッシュセメントであり、仮に $\alpha = 0.5$ とすれば、載荷時

効材令は実際の半分となることから、初期の適合性は向上する。

これらのことから、CEB-FIP式、Bažant式などは、マスコンクリートの応力解析に用いる場合に有効な手段となりうるものと考えてよいことがわかった。ここで明らかとなった結果を利用した、クリープの問題については第7章に於いて改めて論じることとする。

4. 4 結語

冬期および 夏期にベースマットおよび厚肉壁体を模擬した試験体を打設し、これからコアを採取し、強度、ヤング係数を測定した。またマスコンクリートのクリープ特性を明らかにするために、乾燥を防止した状態で、比較的若材令から載荷したクリープ試験をおこなった。この結果、次の点が明らかとなった。

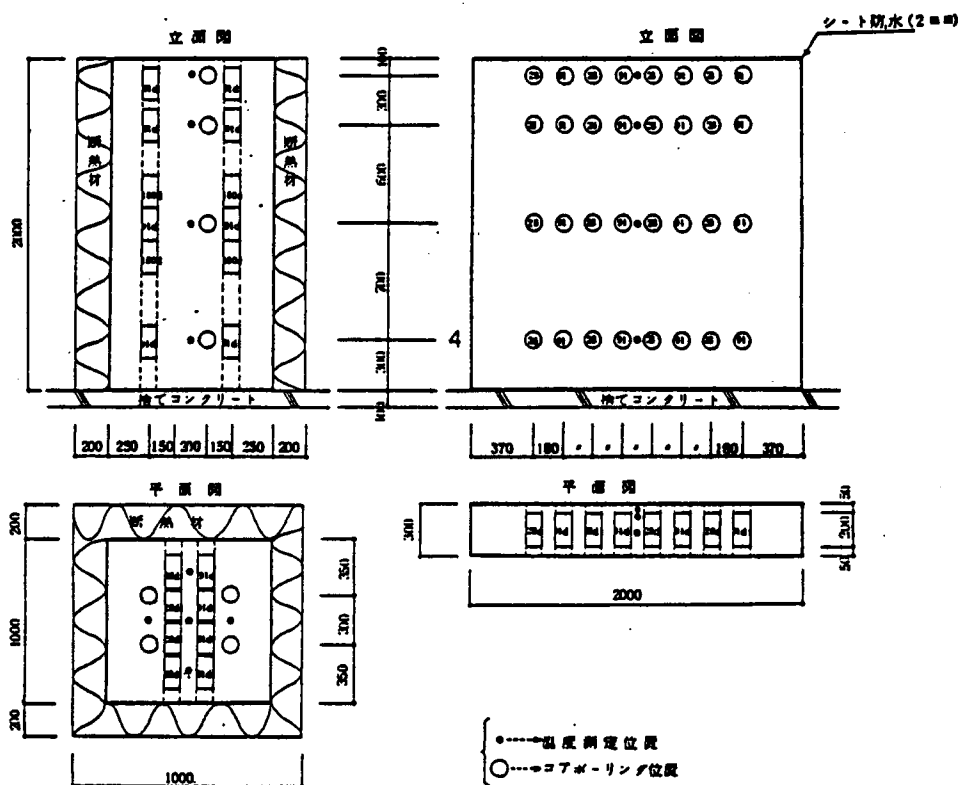
- (1) 同一材料を用い、水セメント比や養生も同一としたコンクリートでも、冬期と夏期では強度発現特性が異なり、夏期では一般に長期強度が低くなることが認められた。これは練り上り温度の影響と思われ、マスコンクリートの応力計算に用いるヤング係数は各期で試しねりを行った結果を用いる必要がある。
- (2) マスコンクリートでは水和熱による硬化促進の影響が大きく、応力計算にあたっては、この点を加味する必要がある。
- (3) 主としてブリージングの影響により、打ち上り面近傍では強度が低下する。内部拘束が主体で、打ち上り面に作用する応力が大きい場合、ひびわれ予測に用いる引張強度は、この点を加味して定める必要がある。
- (4) 強度と積算温度の対数値との間には、直線関係が認められた。また、強度とヤング係数の間にもよい相関関係が存在することが確認できた。これらのことより、温度解析により積算温度をもとめ、強度を推定し、これからヤング係数を求めれば、応力計算上の部材内のヤング係数の経時変化を定めることができる。
- (5) 水分の逸散を防止した管理用供試体強度と積算温度との関係はコア強度から求めた関係とよい一致を示した。このことから、マスコンクリートの強度発現は、通常の供試体から、局部を除いてほぼ推定することができ、試し練りから応力推定に用いる関係式を得ることができる。
- (6) 無載荷でシールした供試体内で、水和による自己乾燥により、約 60×10^{-6} の自己収縮ひずみを生じる。
- (7) 単位クリープと載荷後材令の対数値の間には直線関係が認められた。
- (8) 載荷時材令がクリープに与える影響は大きく、材令 28 日で載荷したときに比べ、材令 1 日で 4.5 倍、3 日で 2.8 倍クリープを示す。これらを加味した単位クリープ推定式を与えた。
- (9) Whitney の法則は厳密には成立しないことが認められた。しかし、精度を

それほど必要としない場合には、これが成立するとしてクリープ解を得るのも近似的な一方法と考えられる。

- (10) 本実験では低発熱性セメントを用いたために、Bažant式、CEB-FIP式とは若材令での載荷の場合に適合性はよくなかった。しかし、セメントの種類を配慮した有効材令を用いることにより、適合性は改善され、これらの計算式はマスコンクリートのクリープを扱う上で有効な方法と思われた。

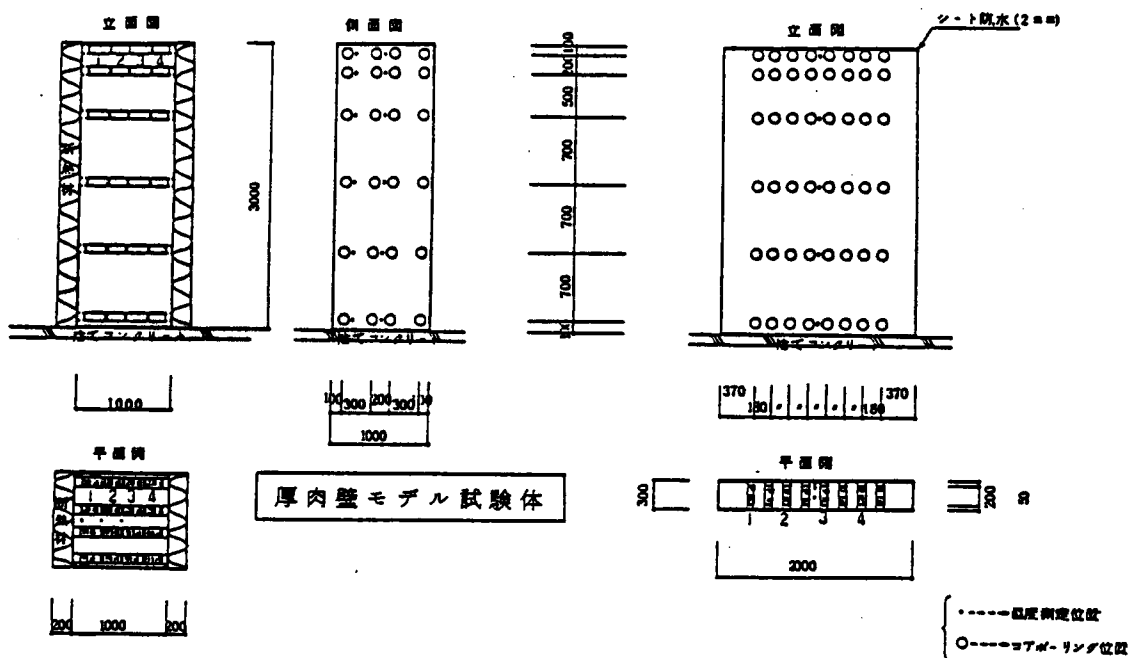
【参考文献】

- 1) 西村他：マスコンクリートの品質管理上の問題点の検討、建築学会大会学術講演梗概集 pp.165-171, 昭和54年9月
- 2) 毛見他：比較的マッシュなコンクリート構造物の強度分布、建築学会大会学術講演梗概集、pp.161-163, 昭和54年9月、
- 3) 高橋他：原子力発電所建設工事におけるコンクリートの品質管理、大林組技術研究所報、No. 19、昭和54年8月
- 4) 高野：打込み温度がマスコンクリートの強度に及ぼす影響の研究、土木学会論文集、第26号、昭和30年5月
- 5) 吉田他：温水養生によるマスコンクリートの温度履歴、温度応力に関する現場実験、土木学会年次講演会概要集、昭和55年10月
- 6) 神山他：マスコンクリートの給熱保護、セメント技術年報、第18巻、pp.400-404, 昭和39年
- 7) A.M.Neville: Properties of Concrete, Pitman Publishing, 1973
- 8) RILEM, Commission 42-CEA : Properties of Set Concrete at Early Ages, Materials and Structures, Vol.14, No.84, Nov.-Dec., 1981
- 9) 原口他：黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリートの打設工事、電力中央研究所報告、375561、昭和51年7月
- 10) CEB: Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete, Georgi Publishing Company, 1984
- 11) H. Rüsch and D. Jungwirth (百島訳)：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮、鹿島出版会、昭和51年11月
- 12) Bazant, Z. P. and Panula, L., : Practical Predictions of Time-dependent Deformations of Concrete, Part 1-Part 4, Materials and Structures, No. 65, 1978, No. 66, 1978, No. 69, 1979
- 13) J. J. Brooks and A. M. Neville, : Predicting Long-term Creep and Shrinkage from Short-term Tests, Magazine of Concrete Research, 1978



ベースメントモデル試験体

単位：(mm)



厚肉壁モデル試験体

図-4.1 試験体の形状、寸法

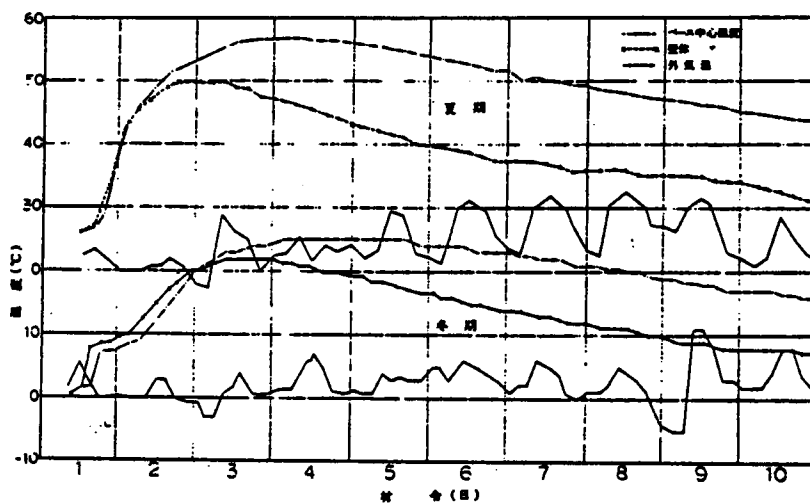


図-4.2 マスコンクリートモデル試験体中心部の温度履歴

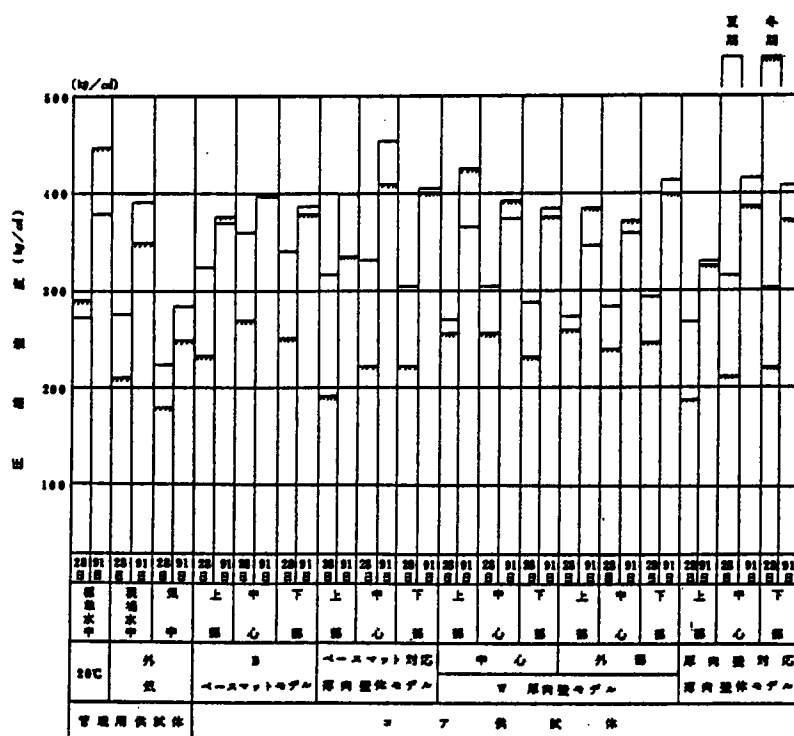


図-4.3 圧縮強度試験結果

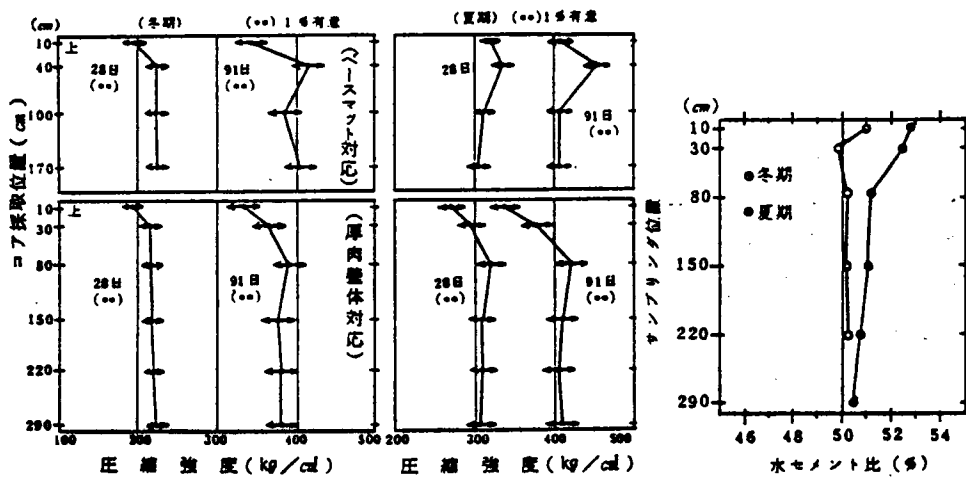


図-4.4 高さ方向のコア強度分布

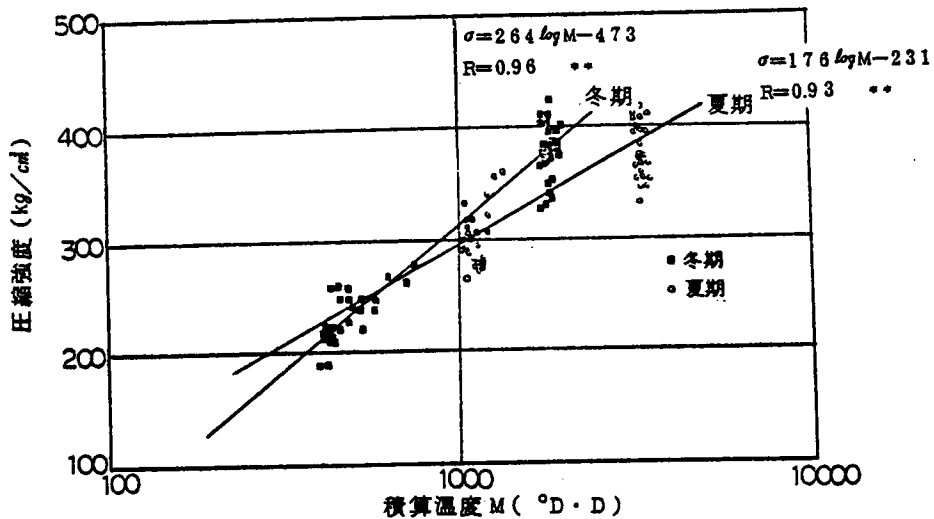


図-4.5 コア強度と積算温度の関係

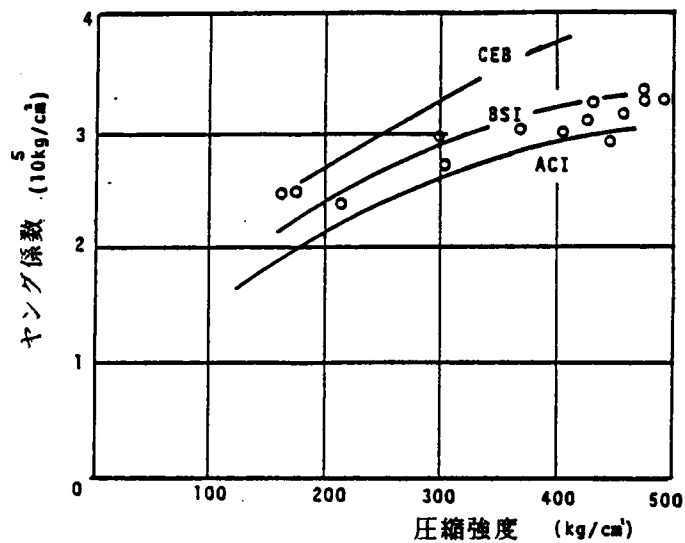


図-4.6 ヤング係数と圧縮強度の関係

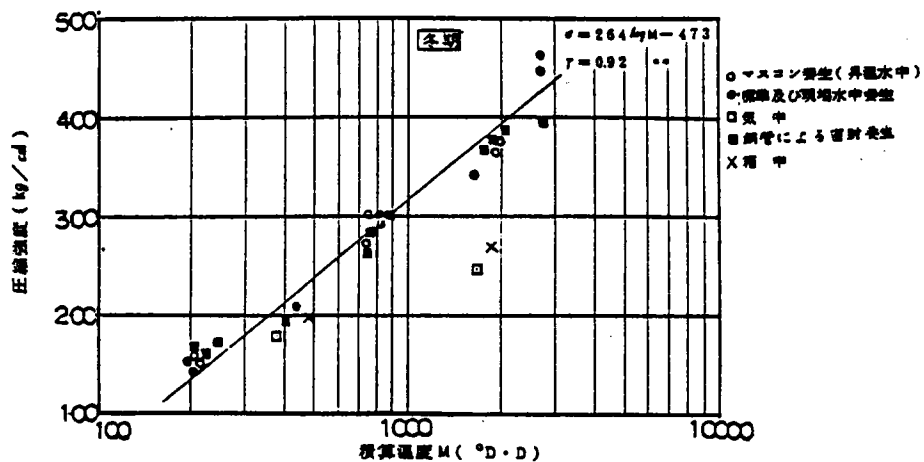


図-4.7 管理用供試体強度と積算温度 (冬期)

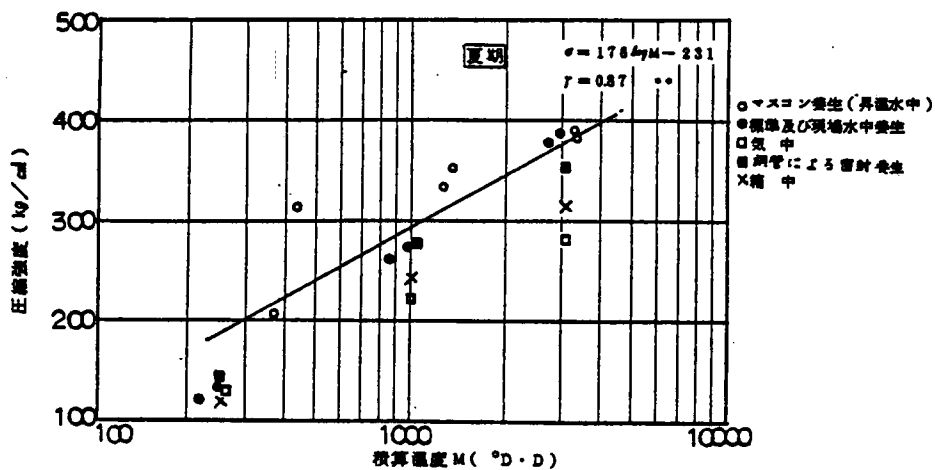


図-4.8 管理用供試体強度と積算温度 (夏期)

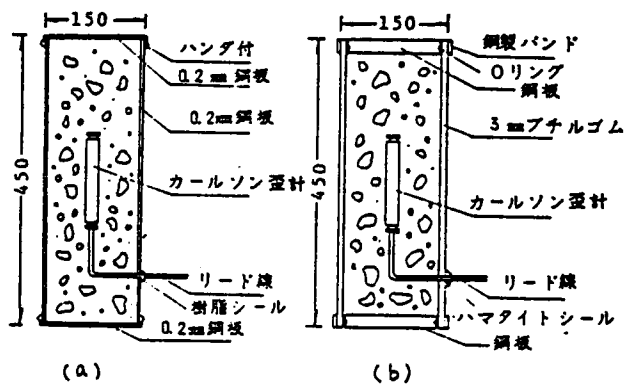


図-4.9 供試体

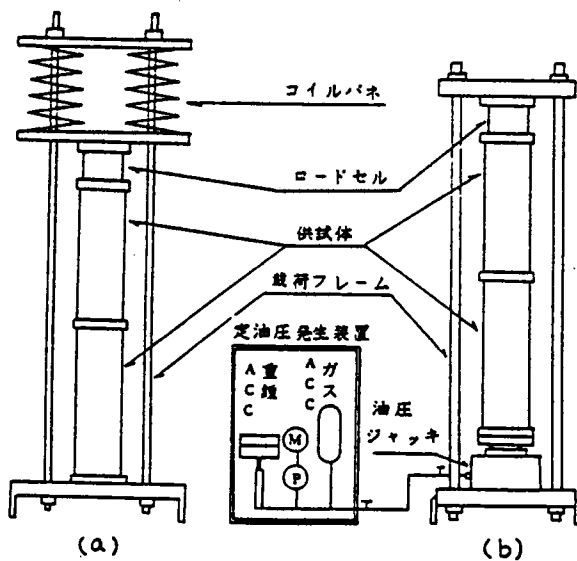


図-4.10 載荷装置

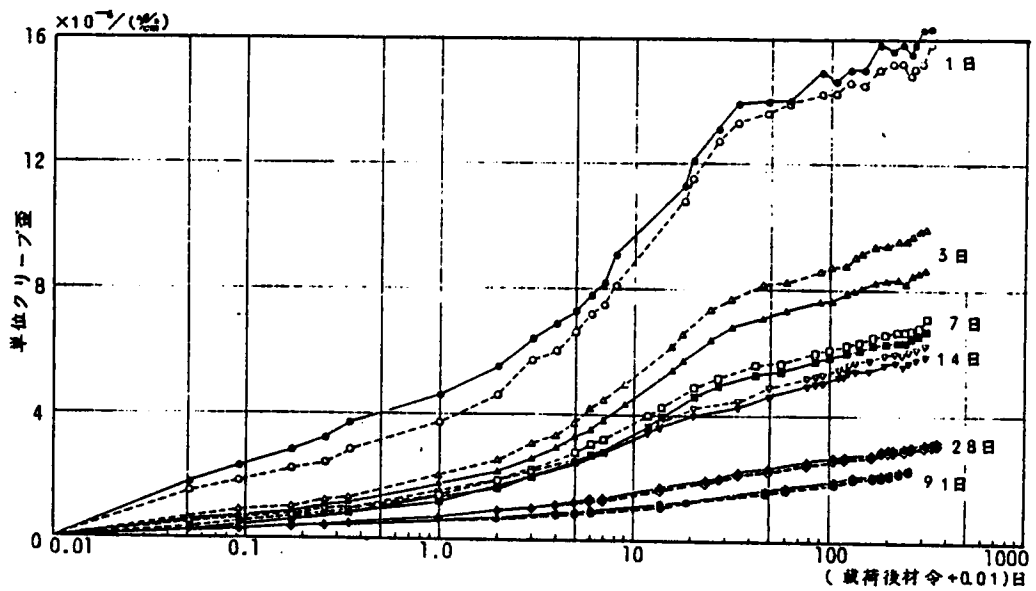


図-4.11 単位クリープ曲線 (自己収縮未補正)

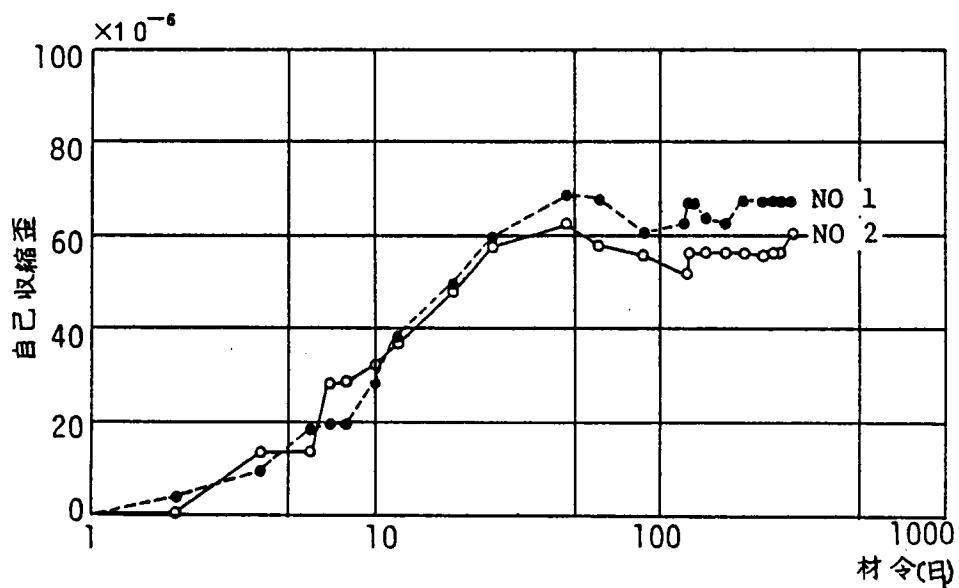


図-4.12 自己収縮ひずみ

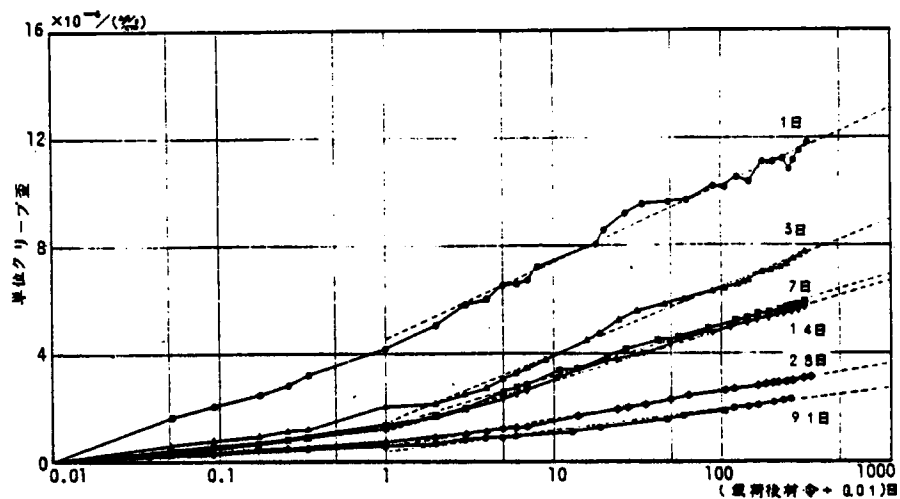


図-4.13 単位クリープ曲線（自己収縮ひずみ補正）

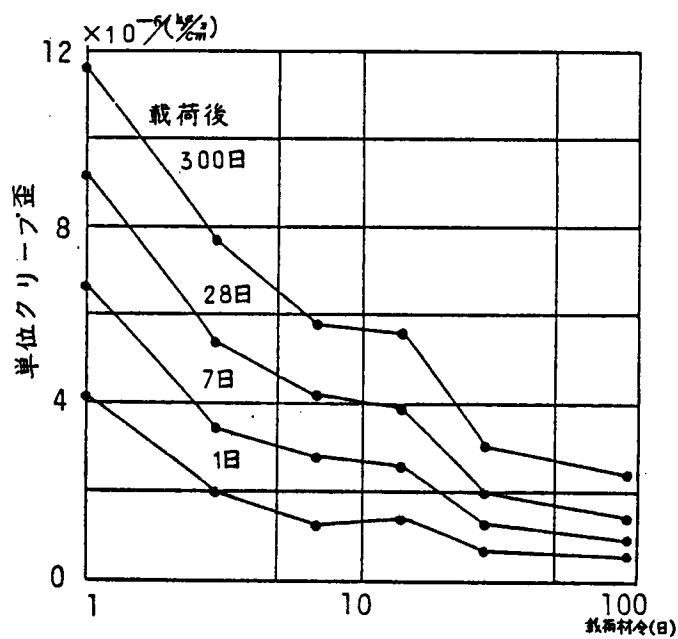


図-4.14 単位クリープひずみと載荷時材令との関係

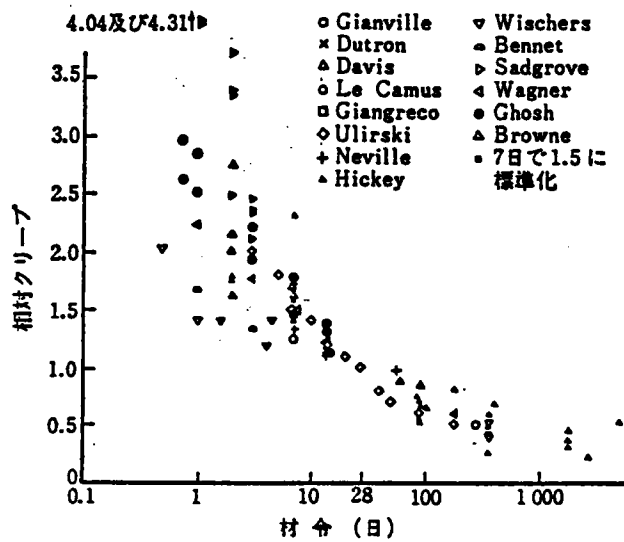


図-4.15 載荷時材令の影響

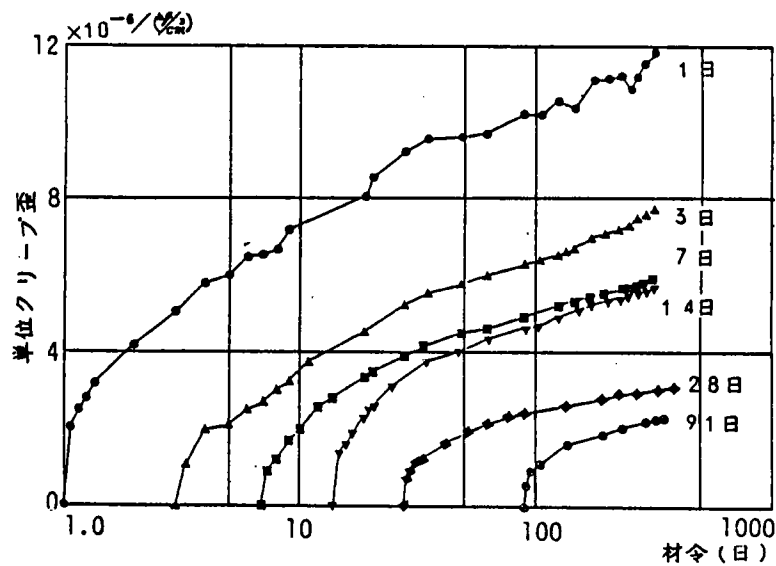


図-4.16 Whitney 法則の適合性の検討

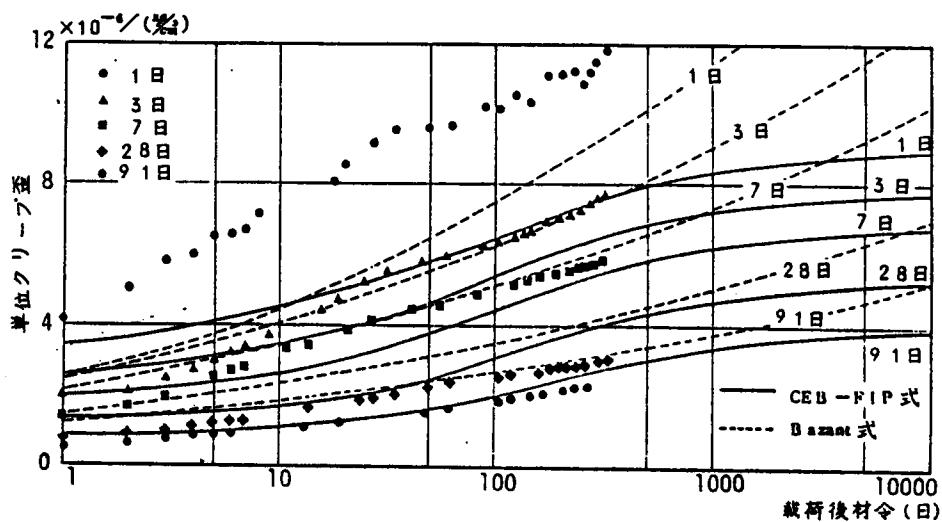


図-4.17 CEB-FIP式, Bazant式と実験結果の比較

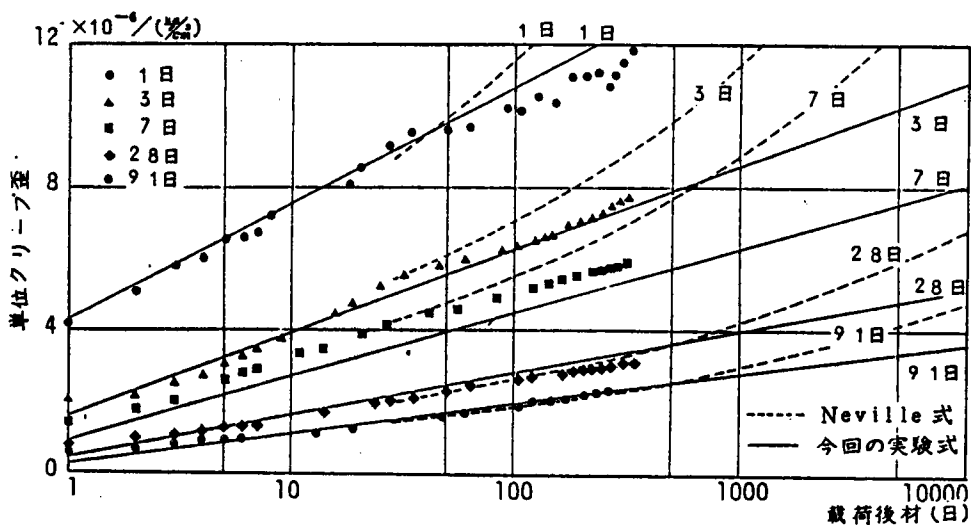


図-4.18 Neville 式および実験結果の比較

表-4.1 中庸熟フライアッシュセメントの物理的性質

(中庸熟ポルトランドセメント：フライアッシュ=8：2)

	比 重	粉 末 度		展 結			曲げ強さ(kg/cm ²)			圧縮強さ(kg/cm ²)			水和熱(cal/g)	
		ブレン(㎏/㏖)	88μ成分(%)	水量(%)	始結(時分)	凝結(時分)	3日	7日	28日	3日	7日	28日	7日	28日
冬 期	2.98	8,420	0.8	28.0	5-10	6-45	29	36	60	98	139	259	53.6	65.2
夏 期	2.99	8,860	1.0	26.8	8-50	5-10	26	34	64	97	131	274	52.0	65.2

表-4.2 骨材の物理的性質

	種 別	比 重	吸水率(%)	単 重(kg/L)	実積率(%)	粗粒率(%)
冬 期	細骨材	2.58	1.6	1,550	65.0	2.55
	粗骨材	2.64	1.1	1,580	60.5	6.98
夏 期	細骨材	2.58	2.1	1,548	65.0	2.90
	粗骨材	2.64	1.45	1,596	61.3	6.95

表-4.3 コンクリートの配合

	W/C(%)	S/a(%)	セメント +F(kg)	水 (kg)	細骨材(kg)	粗骨材(kg)	混 和 剤 ポリリス ⅡB	流動化剤 HP CX(%) 0.065	ス ラ ン プ		空 気 量 (%)
									ベ ー ス (cm)	流動化後 (cm)	
冬 期	5.0	4.5	300	150	825	1,025	0.750 ^{0.065}	0.065	7±1.0	15±1.0	4.0±1.0
夏 期	5.0	4.5	310	155	826	1,082	0.775	0.055			

表-4.4 管理用供試体の種類

(供試体寸法 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$)

区 分	番 号	種 件	養 生 条 件	材 件	備 考
20℃	1	20℃標準水中養生	20℃水中	1, 3, 7, 28, 91*	
	2	20℃封かん養生	20℃、密封	1, 3, 7, 28, 91	鋼缶にて密封する
外 気 温	3	現場水中養生	外気水中	28, 91	JASS 5T-603による
	4	気乾養生	外 気 中	28, 91	試験体の近傍にて養生 (3, 5, 6も同様)
	5	封かん箱内	外気、密封容器内	28, 91	
	6	外気密封養生	外気、密封	28, 91	鋼缶にて密封する
マ ス コ ン 温 度 湿 度	7	ベースマット中心部 温度履歴養生(水中)	ベースマット温度 履歴、水中	1, 3, 7, 28, 91*	温度制御可能な水槽を用 いる(8, 9, 10も同様)
	8	同 上 (密封)	同上 密封	1, 3, 7, 28, 91	鋼缶にて密封する
	9	厚内壁体中心部 温度履歴養生(水中)	厚内壁体温度 履歴、水中	1, 3, 7, 28, 91	
	10	同 上 (密封)	同上 密封	1, 3, 7, 28, 91	鋼缶にて密封する

* ベース配合についても試験する。

表-4.5 圧縮強度試験結果

(kg/cm²)

種 別		材 令 (日)				
		1	3	7	28	91
冬 期	ベ ー ス コ ン グ リ ー ト	13.7	79	144	298	462
	流 動 化 コ ン グ リ ー ト	17.2	80	148	289	445
夏 期	ベ ー ス コ ン グ リ ー ト	33.4	69	119	262	369
	流 動 化 コ ン グ リ ー ト	33.3	69	117	269	377

表-4.6 コンクリートの配合

骨材の 最大寸法 (mm)	フライアッシュ 混入率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/㎡)					
						C	F	W	S	G	A D
25	20	8	4	45	43	290	72	163	745	1014	1905

表-4.7 圧縮強度、ヤング係数測定結果

材令 特性	1日	3日	7日	14日	28日	91日	標準養生 28日
圧縮強度 (MPa)	49	139	221	313	374	463	402
ヤング率 $\times 10^4$ (MPa)	12.1	18.6	24.1	26.1	27.4	32.0	28.0

表-4.8 クリープ試験結果一覧表

試験時の 材令 (日)	試験体 番号	試験応力 (MPa)	試験応力の 強度に対する 比率 (%)	弾性係数 $\times 10^{-4}$	試験後300日の クリープ変位 $\times 10^{-4}$	試験後300日の クリープ係数	近似式の係数		10000日のクリ ープ変位推定値 $\times 10^{-4}$	10000日のクリ ープ係数推定値
							a	b		
1	1	15.6	32	179	189	1.05	2.37	4.50	16.0	1.49
	2			155	176	1.14				
3	1	36.3	27	164	261	1.59	2.51	1.40	11.4	2.31
	2			195	294	1.51				
7	1	54.8	25	253	312	1.26	1.99	1.23	9.79	1.36
	2			264	323	1.22				
14	1	81.4	26	365	448	1.23	1.85	1.11	8.51	1.38
	2			372	480	1.29				
28	1	103.9	23	411	322	0.78	1.04	0.50	4.66	1.20
	2			395	312	0.79				
91	1	103.4	23	376	248	0.66	0.78	0.35	3.47	0.94
	2			387	243	0.63				

第5章 単純拘束モデルによるマスコンクリートの熱応力 評価方法に関する研究

5.1 研究目的

マスコンクリートのひびわれが多発している要因として、大型コンクリート構造物の増加や骨材事情の悪化などによるセメント量の増加、短工期の要請など種々の要因の他に、この状況に対応できる簡易で有効な算定手法を有していないことが大きな要因の一つにあげられる。

定量的なひびわれ評価方法は第2章に述べたように、種々提案されているが現実的にひびわれを予防する観点からは、計算法は次の特徴を有していることが重要である。

- (i) 作業所に常駐する中堅クラスの技術者でも取扱える程度に簡易であること
- (ii) 対策が計算の結果に反映されるものであること
- (iii) ひびわれ防止対策を含めた施工方法を具体的に定める上で、いくつかの試行計算が必要である。この意味から簡易な方法であること
- (iv) 材料特性の経時変化やクリープによる応力緩和など、挙動に影響を与える要因が取入れられ、現象をできるだけ忠実に表していること
- (v) 適用範囲がひろいこと

2章で述べたように、マスコンクリートの応力解析方法として、精度や適用範囲の広いことでは有限要素法が最も優れているが、上記の(i)、(iii)等、実用性という意味では問題がある。逆に、あまりに単純化したものでは(ii)や(iv)に問題が認められる。

本章は、上記の要求を満たす解析法の確立を目的としたものである。

第3章の研究から、単純拘束モデルによるマスコンクリートの応力解析法を展開させることを考え、この方法の内容や特徴等について述べる。

5.2節では外部拘束をうけた場合の、5.3節では外部、内部拘束を受けた場合のマスコンクリートの応力解析法を提案し、適用範囲や解析方法に考察を加える。

また、5.4節では、モデルにおけるマスコンクリート部の材料定数にとりて、既往の研究成果やマスコンクリートであることの特徴を述べる。

最後に、これらと温度解析を含めたマスコンクリートの応力解析システムとして、構成することを試みた。

5. 2 応力発生メカニズムのモデル化とその解法

5. 2. 1 外部拘束に対するモデル化と解析の基本

3章に述べたように、ある形状の拘束体の上にマスコンクリートが打設され、単位温度変化を生じたとき底面における拘束係数 R は、ほぼ次式で近似できることを明らかにした。

$$R = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha r} \frac{E_c(t)}{E_s}} \quad \text{----- (5. 1)}$$

$E_c(t)$: 時刻 t における被拘束体のヤング係数 E_s : 拘束体のヤング係数

$$\alpha r = f(L/H) = A_s / A_c \quad \text{----- (5. 2)}$$

αr : 拘束体の被拘束体に対する拘束面積比

このことは、図-5. 1に示すように、バネ剛性が $A_s E_s = A_c \alpha r E_s$ である拘束バネによって拘束された場合に、剛性 $A_c E(t)$ を有する物体(コンクリート)が、単位の温度変化 ΔT を生じる場合の応力を求める問題に置換できることを示している。実際のコンクリートでは水和熱による温度上昇降下に伴い、ヤング係数が経時的に変化するので、拘束度も時間的に変わることをも考えなければならない。

このようなモデル化は、森田らが乾燥収縮によって生じる拘束応力を求める場合の適用しており、ひびわれと配合、養生の関係について論じている。⁽¹⁾

この点を配慮した単純拘束バネに生じる応力は次のような方法で求めることができる。

モデルのコンクリート部に生じるひずみ $\varepsilon(t)$ は初期応力がない場合、次式で与えられる。

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha T_c(t) \quad \text{----- (5. 3)}$$

E_0 : 基準材令におけるヤング係数

$E(t)$: 時刻 t における "

$\varphi(t-\tau, \tau)$: 時刻 τ で載荷された場合の t におけるクリープ係数

$T_c(t)$: 時刻 t におけるコンクリート部の温度

α : コンクリートの膨張係数

コンクリートの断面積を A_c 、バネの剛性を K_s とすると力のつりあいが成立することから

$$\sigma(t) A_c + \varepsilon(t) \cdot K_s = 0 \quad \text{----- (5.4)}$$

上の2式から $\varepsilon(t)$ を消去すると

$$\int_0^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha T_c(t) = - \frac{A_c}{K_s} \sigma(t) \quad \text{----- (5.5)}$$

この式は単純拘束モデルで示したときのマスコンクリートの外部拘束応力を求める基本式であり、応力を求めることは上のVolterra型Ⅱ種積分方程式を数値解析等で解けばよい。

一例として、Nevilleは収縮応力の計算に数値計算法を示しているが、同様の方法を適用してみる。図-5.2に示すように時間分割を行い、 $E(T_i) = E_i$ 、 $\varphi(T_{i+1/2}, T_j) = \varphi_{ij}$ のように略記すると式(5.5)は、

$$\sum_{j=1}^i \left[\Delta \sigma_j \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi_{ij}}{E_0} \right) \right] + \alpha T_{c, i+1/2} = - \frac{A_c}{K_s} \sigma_{i+1/2} \quad \text{----- (5.6)}$$

これを書き換えると

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{E_i} + \frac{\varphi_{ii}}{E_0} + \frac{A_c}{K_s} \right) \sigma_{i+1/2} \\ & = \left(\frac{1}{E_i} + \frac{\varphi_{ii}}{E_0} \right) \sigma_{i-1/2} - \alpha T_{c, i+1/2} - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_j \left(\frac{1}{E_j} + \frac{\varphi_{ij}}{E_0} \right) \end{aligned} \quad \text{----- (5.7)}$$

が得られ φ_{ij} 、 E_j が与えられていれば、右辺が1ステップ前の段階を示すので、逐次計算により、応力の変化を求めることができる。

5.2.2 外部拘束、内部拘束を受ける場合の解析モデルと解法

(1) 解析モデルの提案

前項では部材内が均一な温度分布を保持して変化する場合を述べたが、実際には不均一な温度分布を示すので、これによる応力、すなわち内部拘束応力をも考慮する必要がある。内部拘束応力のみを求める場合には、第2章に示したように拘束系が温度分布から求まることから比較的容易に解くことができる。ヤング係数が増加する場合においても時間々隔ごとに応力増分を求め、この総和を求めればよい。

しかし、一般には内外拘束が同時に存在し、これらの応力場で材料定数の変化

等を考慮する必要がある。ここでは、前節を発展させることを考えた。すなわち次に示すように、部材を n 個の要素に分割した離散化モデルを用いれば、両拘束を併せた型で任意の温度分布を示す場合の応力を求めることができる。

図-5. 3は改良された一軸拘束モデルである。このモデルでは、バネによって外的に拘束されるコンクリートは、いくつかの棒状の要素によって構成されている。

モデルの端部には剛体が設けられているため、各要素の実歪の変化は、要素間で等しく、各要素に異なった体積変化が生じた場合には、この条件の下での内部拘束応力が生ずることになる。また、全要素の平均された体積変化がバネに拘束されることによって生じる外部拘束応力も前に説明しているように、このモデルで同時に解析することができる。

コンクリート工学協会、温度応力研究委員会では、軸拘束の他、曲げ拘束をも考えているが、本方法では曲げ拘束度を1.0としていることになる。本方法では委員会の指摘している拘束度1.0以上の過拘束について解析を行うことはできない。

しかし、実際には部材が弾性的に曲げ拘束されると共に、自重の影響、隣接ブロックの拘束が作用するので、曲げ拘束度を1.0とすることは、妥当と思われる。

つぎに、マッシブなコンクリート部材を持つ実構造物とこのモデルとの対応関係について述べる。通常よく遭遇するマッシブなコンクリート部材の一例として、マットコンクリート上に打設された厚肉の壁体について考えよう。図-5. 4は、マットコンクリート上に打設された厚肉の壁体を示している。壁体中の熱は、主として壁体の両面から拡散する。そのため壁体内では厚さ方向の温度勾配が卓越している。従って壁体内の内部拘束応力を算定するために、図-5. 4に示すように、壁体を鉛直方向に分割したいくつかの要素におきかえる。これらの要素の体積膨張、収縮の差によって生じる応力で壁体の内部拘束応力を近似でき、各要素の平均温度の履歴をモデルの各要素の温度履歴におきかえた解析から、壁体の外部拘束応力を算定することができる。

ここで提案している解析モデルでは、先に述べたように、各要素の実歪の変化は、要素間で一様であるとしているため、実構造物の壁の長さが、厚さと高さに比べて同等以下の場合には、二次元的ないしは三次元的な変形が生じ、このような仮定は難しくなるが、実際の構造物ではこのような例は非常に少ないので、実用上はほとんど問題はない。

マットコンクリート部分は、壁全体の平均された体積変化を外的に拘束している部材であり、解析モデルでは拘束バネで表現されている。

マッシブな実構造物の内部温度の分布を考え、適切な要素分割を行ってモデル化すると、厚肉の壁体の他にも岩盤上に打設されるマットコンクリート中の拘束

応力、その他のかなりのマッシブなコンクリート部材の温度応力の算定が、このモデルで可能となる。

6-(2)
以上のように本提案法は次のようにまとめることができる。R. Springenschmidらは、図-5.5に示すように、拘束応力を3種に分類している。本解析法では一様な熱収縮に対しては、拘束度に応じた弾性拘束応力を、曲げ変形や内部拘束に対しては、完全拘束として応力を求めていることになる。

ただし、ここで示す解析法は、3章で明らかにしたように、外部拘束応力については、実構造物における被拘束体の底面（打ち継ぎ面）において生じる外部拘束応力の最大値を算定しており、この応力が被拘束体の全面に一様に分布する状態に近似した解析を行っていることになる。

また、実際の壁体では、壁の両端部で、打ち継ぎ面のすべりや、曲げによる影響のため応力分布は、中央部に比べて乱れており、応力の値は、モデルで算定されるものよりは小さくなっているが、マッシブなコンクリート部材に生じるひびわれを予測するという目的からは、最大の応力を生じる壁の中央部についての解析を行えば十分であり、このモデルによる解析は、妥当なものと考えられる。

一方、マッシブなコンクリート部材の外部拘束応力の高さ方向の分布や局所的な分布、および内部拘束応力を詳細に解析しようとするれば、三次元の有限要素法を用いた解析が必要である。しかし、一般のマッシブなコンクリート部材の温度応力解析では、コンクリートの物性の変化を考慮したクリープ解析が必要な点を考慮すると、計算コストと手間の点で有限要素法による解析によるよりはここで提案しているような実構造物を単純化したモデルに置きかえた解析のほうが有効なものと考えられる。

このようなモデル化はさらに発展させることが可能である。

ベースマット状構造物や、幅に対して高さの高い壁性マスコンクリートでは、一般には一次元の温度分布を考えれば十分であることが多い。しかし、厚さと高さが同程度の壁体のような場合には二次元的な温度分布を考える必要が生じることもある。このような場合にコンクリート部を x, y の2方向に分割し、平面保持を仮定すれば、前節と全く同様の扱いで、各要素の応力を求めることができる。（図-5.6(a)参照）

また、ダムコンクリートあるいは厚肉のベースマット等では、何層かのリフトに分割されて打設される。このような場合には図-5.6(b)に示すように、各リフトの要素を n 個に分割したモデルを考え、材令 t で m リフトが打設されるまでは、剛性がない（計算上ではマチュリティがゼロ）の扱いをすればよい。ただし拘束度は3章に述べたような配慮が必要である。このような場合の解析例は、第8章において示す。

(2) モデルの解析法

マシブなコンクリート部材の温度応力を算定するためには、コンクリートの物性の経時的な変化を考慮したクリープ解析を行わなければならない。そのため、ここでは、クリープと物性の連続的な変化の過程をステップバイステップに近似した増分法による解析を行うこととする。

図-5.3に示した解析モデルのコンクリート要素の数を n 個とする。図-5.7は、 k 番目の要素の熱膨張、収縮による自由歪の変化と応力の変化およびモデル全体の実歪の変化の例を示しており、これらの変化を図に示したように微小時間に分割し、ステップバイステップで解析してゆく。

いま、 i 番目のステップにおける各要素とバネの応力増分を算定する方法について説明する。 i 番目のステップの終わりまでに生じている各要素とバネの応力は、 i 番目のステップまでの各ステップで生じた応力増分の和である。

k 番目の要素の i ステップにおける自由歪の増分を $\Delta \varepsilon_{k,i}$ 、 $1 \sim (i-1)$ までのステップにおける応力増分によるクリープ歪の増分を $\Delta \varepsilon_{ck,i}$ 、ヤング率を $E_{k,i}$ 、実歪の増分を $\Delta \varepsilon_i$ 、とすると、応力増分 $\Delta \sigma_{k,i}$ は次式で表わせる。

$$\Delta \sigma_{k,i} = E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i}) \} \quad (5.8)$$

クリープ歪の増分 $\Delta \varepsilon_{ck,i}$ は後述するクリープ係数と重ね合せ法を用いて次式で算定される。

$$\Delta \varepsilon_{ck,i} = \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\Delta \sigma_{k,j}}{E_{c28}} (\varphi_{k,i,j} - \varphi_{k,i-1,j}) \quad (5.9)$$

クリープ係数 $\varphi_{k,i,j}$ は、 j ステップで載荷した後 i ステップまでのクリープ係数である。

拘束バネの自由歪の増分を $\Delta \varepsilon_{s,i}$ 、ヤング率を E_s とすると、 i ステップのバネの応力増分 $\Delta \sigma_{s,i}$ は、次式で表わせる。

$$\Delta \sigma_{s,i} = E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) \quad (5.10)$$

(5.8)、(5.10)式よりつり合い条件式として次式が求まる。

$$\sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i}) \} + A_s E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) = 0 \quad (5.11)$$

(5.11) 式から実歪の増分 $\Delta \varepsilon_i$ は、次のように求まる。

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{\sum_{k=1}^n \{A_k \cdot E_{k,i} (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i})\} + A_s E_s \Delta \varepsilon_{s,i}}{\sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} + A_s E_s} \quad \text{----- (5.12)}$$

(5.12) 式の $\Delta \varepsilon_i$ を (5.8)、(5.10) 式に代入すると、各要素の応力増分とバネの応力増分が求まる。

しかし、(5.9) 式によるクリープ歪増分には、このステップの応力増分 $\Delta \sigma_{k,i}$ によるクリープ歪の増分を含んでいないため、ここで求まる解は、近似解であり、正解は、 $\Delta \sigma_{k,i}$ によるクリープ歪の増分を含む次の関係を満足していなければならない。

i ステップで生ずる応力増分による k 番目の要素のクリープ歪の増分を $\Delta \varepsilon'_{ck}$ とすると、これは次式で求まる。

$$\Delta \varepsilon'_{ck} = \Delta \sigma_{k,i} \varphi_{k,i,i} / E_{c28} \quad \text{----- (5.13)}$$

応力増分 $\Delta \sigma_{k,i}$ は、 $\Delta \varepsilon'_{ck}$ を考慮すると次式で表わせる。

$$\Delta \sigma_{k,i} = E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i} + \Delta \varepsilon'_{ck}) \} \quad \text{----- (5.14)}$$

このときつり合い条件式は次のようになる。

$$\sum_{k=1}^n A_k \Delta \sigma_{k,i} + A_s E_s (\Delta \varepsilon_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) = 0 \quad \text{----- (5.15)}$$

(5.13) ~ (5.15) 式より各要素の応力増分 $\Delta \sigma_{1,i} \sim \Delta \sigma_{n,i}$ に関する次の式が求まる。

$$\begin{aligned} & A_1 \Delta \sigma_{1,i} + A_2 \Delta \sigma_{2,i} + A_3 \Delta \sigma_{3,i} + \text{---} \\ & \text{---} + (A_s E_s / E_{k,i} + A_s E_s \varphi_{k,i,i} / E_{c28} + A_k) \Delta \sigma_{k,i} + \text{---} \\ & + A_n \Delta \sigma_{n,i} = A_s E_s (\Delta \varepsilon_{s,i} - \Delta \varepsilon_{k,i} - \Delta \varepsilon_{ck,i}) \end{aligned} \quad \text{----- (5.16)}$$

上式の k を 1 ~ n に変化させて求まる n 個の式による連立方程式を満たす $\Delta \sigma_{1,i} \sim \Delta \sigma_{n,i}$ が応力増分の正解である。

(5.8)～(5.12)式によって求まる応力増分は、かなり良い近似解であるので、(5.16)式による連立方程式を直接解くかわりに、これらの応力増分を第一近似解とした次に示すようなくり返し計算を行って等価な解を求めればよい。

- (1) 応力増分の第一近似解から(5.13)式により、この応力増分によるクリープ歪増分 $\Delta \varepsilon'_{ck}$ を算定する。
- (2) (1)で求めた $\Delta \varepsilon'_{ck}$ を用いて次のつり合い条件式からモデルの実歪の増分 $\Delta \varepsilon'_i$ を算定する。

$$\sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon'_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i} + \Delta \varepsilon'_{ck}) \} + A_s E_s (\Delta \varepsilon'_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) = 0 \quad (5.17)$$

$$\Delta \varepsilon'_i = \frac{\sum_{k=1}^n \{ A_k E_{k,i} (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i} + \Delta \varepsilon'_{ck}) \} + A_s E_s \Delta \varepsilon_{s,i}}{\sum_{k=1}^n A_k E_{k,i} + A_s E_s} \quad (5.18)$$

- (3) (5.18)式を用いると各要素の応力増分 $\Delta \sigma'_{k,i}$ およびバネの応力増分 $\Delta \sigma'_{s,i}$ は、次式で算定される。

$$\Delta \sigma'_{k,i} = E_{k,i} \{ \Delta \varepsilon'_i - (\Delta \varepsilon_{k,i} + \Delta \varepsilon_{ck,i} + \Delta \varepsilon'_{ck}) \} \quad (5.19)$$

$$\Delta \sigma'_{s,i} = E_s (\Delta \varepsilon'_i - \Delta \varepsilon_{s,i}) \quad (5.20)$$

- (4) (5.19)式の $\Delta \sigma'_{k,i}$ を用いて(1)と同様にして $\Delta \varepsilon'_{ck}$ を算定し(1)(2)(3)の過程を解が収束するまでくり返し計算する。

この解法では、第一近似解が正解にかなり近いので、3～4回程度の繰り返しで十分な精度で収束した解が求まる。

(3) FEM解析との対比

単純拘束モデルによる解析の妥当性を検討するため、FEM解析との比較を行った。FEM解析は拘束度Rのシミュレーションと題してコンクリート工学協会、マスコン温度応力研究小委員会活動の一環として実施されたものの一例を用いた。すなわち図-5.8に示すように岩盤上に長さ15m、高さ1.5m(L/H=10)の版状構造物が打設されたときの熱応力を求めるものである。但し、本解析ではクリープについては、両方法とも考慮せず、ヤング係数は経時的に変化するものとした。解析に用いた熱的、力学的特性値は表-5.1に示す。モデルによる解析においても、温度履歴、要素分割および静弾性係数は同一とした。両者の解析結果は図-5.9に示すように、ほとんど差異は認められない。若干の差

は、モデル解析において単位時間を一定にしていること、および拘束度（材令 28 日）を A C I 式で評価し、拘束体の有効面積を被拘束体の 2.5 倍であるとしたことによるものであろう。本解析のように、 L/H が大きい場合は、拘束度が一樣に近いことから、単純拘束モデルによる方法においても、F E M 解析と等しい応力分布となり、提案した方法で十分な解が得られるといえる。

5. 3 材料定数の取扱いとシステムの構成

5. 3. 1 概要

マスコンクリートにおいては、水和熱によって自己加熱され、このために硬化が促進されることを、ヤング係数をはじめとする材料定数の決定にあたって考慮する必要がある。このためには、積算温度の概念を計算式の中に導入することが取扱い上簡便である。すなわち、温度計算により得られた温度履歴から任意の位置（要素）、材令に対する積算温度が得られるので、これに対応した材料定数を求めるか、積算温度から有効材令 t_e を求め、材料定数と有効材令の関係式から求めるかの方法をとれば、硬化促進の影響を加味したことになる。第2章において、このような方法が既往の研究から可能であることを示した。

本節では、単純拘束モデルによる応力解析に用いるクリープ、ヤング係数およびひびわれ発生基準としての強度等の材料特性に対する基本的考え方と、解析システムの構成について述べる。

5. 3. 2 クリープ係数の算定法

マッシブなコンクリート部材に生じるクリープは、ごく初期材令の圧縮と引張の両方の応力域におけるものであり、しかも強度レベルにかなり接近した応力域の非線形クリープが生じることや、変動する応力と温度の両方の場におけるクリープであること等を考えると、これらの要求条件を満足するデータは少なく、厳密な解析は難しい。

ここでは、第4章における結果から、圧縮クリープについてのCEB-FIPの指針⁽⁴⁾を圧縮、引張の両方に基本的に使用し、これに、指針の背景となっているRüsch⁽⁵⁾のデータ等から多少の修正を加えた次のような式でクリープ係数を算定することとした。また強度レベルに接近した応力域での非線形クリープは無視しており、全てを線形クリープの問題として取り扱うこととした。

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \sigma_0 \varphi(t, t_0) / E_{c28} \quad \text{-----} \quad (5.21)$$

$$\varphi(t, t_0) = \beta_a + 0.4\beta_a(t - t_0) + \varphi_f(\beta_f(t) - \beta_f(t_0)) \quad \text{-----} \quad (5.22)$$

$$\beta_a = 0.8(1 - f_c(t_0) / f_{c\infty}) \quad \text{-----} \quad (5.23)$$

上式中、 $\varepsilon_c(t, t_0)$ は、材令 t_0 で載荷した場合の材令 t におけるクリープ歪、 $\varphi(t, t_0)$ は、同様のクリープ係数、 σ_0 は、載荷応力、 E_{c28} は、標準養生材令28日のコンクリートのヤング率である。

クリープ係数を示す(5.22)式の第一項は、急速初期変形、第二項は、遅延弾性、第三項は、塑性流動を表わしている。クリープ変形成分のこのような分割については、異論を唱える研究者もいるが、⁽⁶⁾ここでは、一応CEB-FIPの表現を用いる。

急速初期変形は、CEB-FIPの式では、主としてPC構造物等に生ずる長期材令でのクリープを対象としているため、(5.23)式の表現では、進行度の関数を持っていない。しかし、マッシブなコンクリート部材のクリープについて解析するため、急速初期変形も進行度の関数で表示する必要がある。

ここでは、Rüsch が示した進行度曲線を対数関数で近似した次の式によって、急速初期変形を算定することとした。

$$\beta_a = 0.8(1 - f_c(t_0)/f_{c\infty}) (1 + 0.48 \log t) \text{ --- (5.24)}$$

遅延弾性の項で使用している進行度の関数 $\beta_d(t-t_0)$ としては、指針に与えられている進行度曲線を折れ線近似したものを使用すればよい。

塑性流動の項は、仮想部材厚に従って定め、進行度の関数 $\beta_f(t)$ としては、指針に与えられている曲線を折れ線で近似したものを用いればよい。また、基本流動係数としては、7章に述べするように、 $\beta_f = 1.2 \sim 1.5$ の範囲で定めればよい。

ところで、変動応力の影響は、重ね合わせ法で評価している。また、クリープ係数は、次式で与えられる温度関数を各ステップごとに適用し高温になることによりクリープの増加を考慮した算定を行うこととした。(7)(8)

$$\alpha = 0.40 + 0.03 T \text{ --- (5.25)}$$

上式中、Tは温度(°C)である。 α はT=20°Cのとき1.0となる関数である。

5.3.3 ヤング率の算定法

マッシブなコンクリート部材の水和熱による温度応力を解析する場合、部材の温度履歴を考慮して、ヤング率の経時的な変化を評価する必要がある。そのため、第4章の結果を考慮して、(1)温度履歴から積算温度を求める、(2)積算温度から圧縮強度を求める、(3)圧縮強度からヤング率を求める、という方法をとることとした。

(2)(3)の過程で用いる関係式は、第2章で示した多くの関係式から、適合性の良いものを選定すればよい。

5.3.4 ひびわれ発生の判定基準

マッシブなコンクリート部材の施工に用いるセメント種別、セメント量、あるいはクーリングの計画、等の条件からその部材に水和熱によるひびわれが発生す

るかどうかを検討し、ひびわれ発生の可能性のある場合には、さらに前記の諸条件について、技術的な可能性と経済性の点で許容される範囲で、計画の変更が要求される。ひびわれ発生の可能性を判定するためには、温度応力の解析結果とひびわれ発生の基準とを照合しなければならない。

マッシブなコンクリート部材のようなクリープ変形をしている部材のひびわれ発生の基準としては、応力の限界値と歪の限界値およびこれらの確率分布を考慮した破壊基準が、厳密には要求される。確率的な取扱いは、第7章で述べることにする。また、第2章に述べたように歪の限界値を用いるには十分なデータがなく、既往の文献間のばらつきも大きいから、ここでは積算温度を考慮した圧縮強度から、圧縮強度と引張強度とのACI式等の関係式⁽⁹⁾を用いて引張強度を算定し、部材中の引張応力の最大値が、ある材令で引張強度を上回る時に、ひびわれが発生するものとする応力の限界値によるひびわれ発生の基準を当面は使用する。

後で述べるように、ここで提案している解析法による温度応力の算定結果と、引張強度とを用いて求めた実験用供試体のひびわれ発生時の材令と、実際にひびわれが発生した材令とは、比較的良好に一致しており、近似的には、ひびわれ発生の基準として引張強度を用いてもよいものと考えられる。

5. 3. 5 システムの構成

上述の応力解析法を含めて、ひびわれ予測システムとして構成したものを図-5. 10示す。

ひびわれへの影響要因との関連で述べると次のようである。リフト厚、セメント種別、セメント量および養生、打設、外気温度等は温度解析の結果、温度履歴として現われ、各要素の温度の経時変化として与えられる。

また、部材の形状や拘束系は拘束度に反映される。温度履歴から積算温度が算定でき、圧縮強度やクリープの有効材令が求められる。

圧縮強度からヤング係数、引張強度が求まり、応力計算とひびわれ発生の判定に用いられる。

このように、本システムを用いることにより、各種の対策が定量的に評価でき、しかもパソコン等を用いれば比較的容易に情報が得られることから、5. 1で述べた5つの条件が満足された応力評価が可能である。

5. 4 結語

本章では、単純拘束モデルを用い、材料定数の評価に既往の研究成果を取り入れた方法を採用することにより、一つのマスコンクリートの応力評価システムを提案した。ここでは、この提案の特徴の概要を以下に示すことによって結語とする。

- (1) マスコンクリートの最大拘束応力が弾性バネで拘束されたとき生じる応力に相当することに着眼し、いくつかの要素より成るマスコンクリート部と、バネ部から構成される拘束系を応力解析の基本系として与えた。
- (2) 本方法により、内部拘束、外部拘束が同時に存在する場合の熱応力を容易に求めることができる。各要素の特性を変化させることにより、温度履歴の差による部材内材料特性の分布を加味したり、ダムのように積層打設が行われる場合の解析に発展させることができる。
- (3) 本方法は、一様な伸縮に対してはバネによる弾性拘束を、そりや不均一なひずみ分布に対しては完全拘束を与えていることになる。
- (4) このモデルにおけるコンクリート部の要素に、クリープの影響や材料特性の経時変化や温度の影響を加味することが可能で、逐次数値解析を行うことにより、発生する応力の変化を詳細に求めることができる。
- (5) ヤング係数やひびわれ限界としての引張強度は、積算温度から圧縮強度を求め、強度とこれらの関係式を利用して求めることができる。
- (6) 温度解析と組み合わせたシステムを構成することにより、マスコンクリート部材のひびわれに関連する要因、換言すれば対策の効果が定量的にしかも容易に評価することが可能である。
- (7) 本方法は、収縮応力や気温変動による２次応力の解析にも適用することが可能である。

【参考文献】

- (1) 森田、狩野：RC構造のきれつと その対策についてのノート、講習会資料
- (2) Ghali, A., Neville, A.M. and JHA, P.C. : Effect of Elastic and Creep Recoveries of Concrete on Loss of Prestress, ACI Journal, 64, pp.802-810 . 1967
- (3) Neville, A.M. : Creep of Concrete, Plain, Reinforced and Prestressed, 1970
- (4) CEB-FIP, International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures, Volume 2, CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1978
- (5) H. リッシュ, D. ユングビルト：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮, 鹿島出版会, 1977 (百島 訳)
- (6) Z. P. Bazant E. Osman : On the Choice of Creep Function for Standard Recommendations on Practical Analysis of Structures, Cement and Concrete Research, Vol. 5, 1975
- (7) 岡田他：高温下におけるコンクリートのクリープ、竹中技術研究報告、第17号、pp.59-66, 1977.4
- (8) 大沼他：プレストレストコンクリート円環体の加熱実験による高温クリープ挙動の検討、電力中央研究所、研究報告 74016 昭和50.7
- (9) ACI 207 Committee : Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Journal of ACI, Vol. 70, No. 7, pp.445-470, July 1973

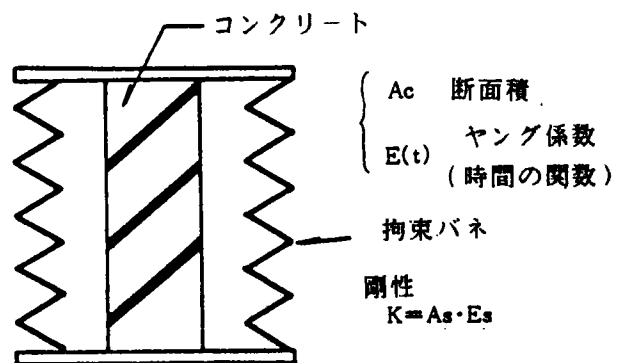


図-5. 1 マスコンクリートに対する単純拘束モデル

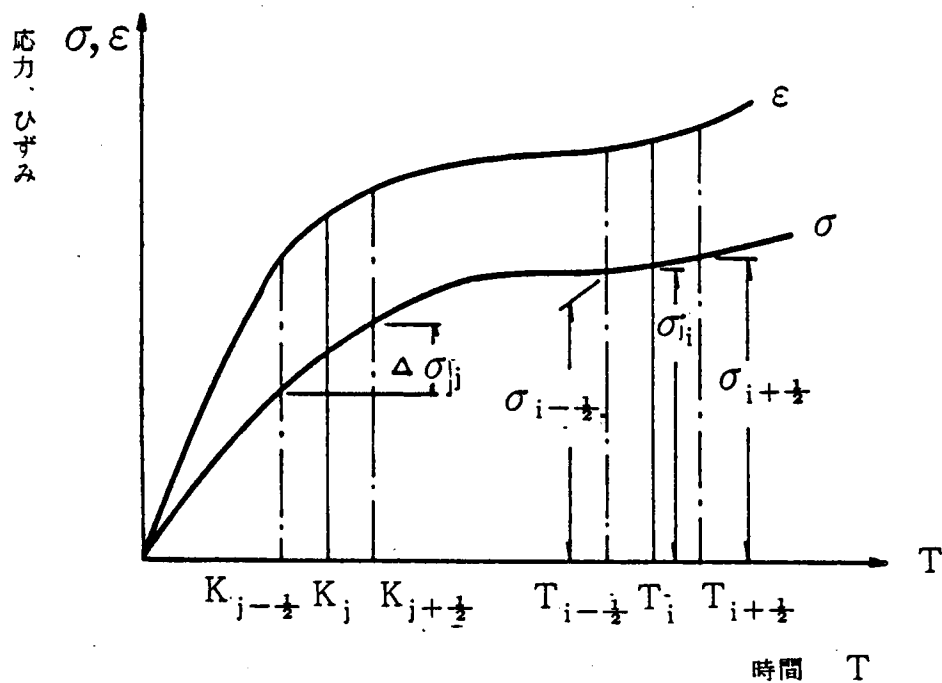


図-5. 2 逐次計算における分割

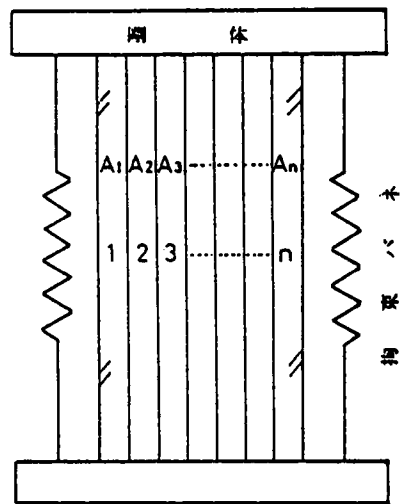


図-5.3 複数要素をもつ単純拘束モデル

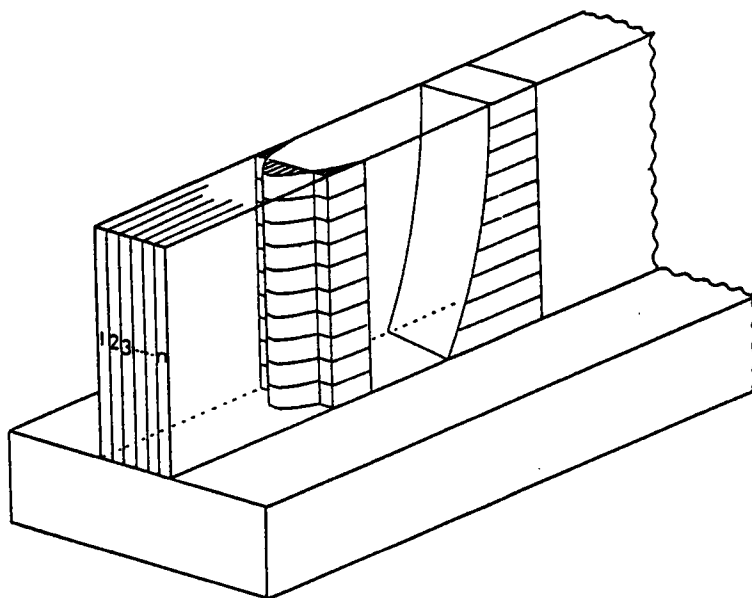


図-5.4 壁状マスコンクリート構造物のモデル化

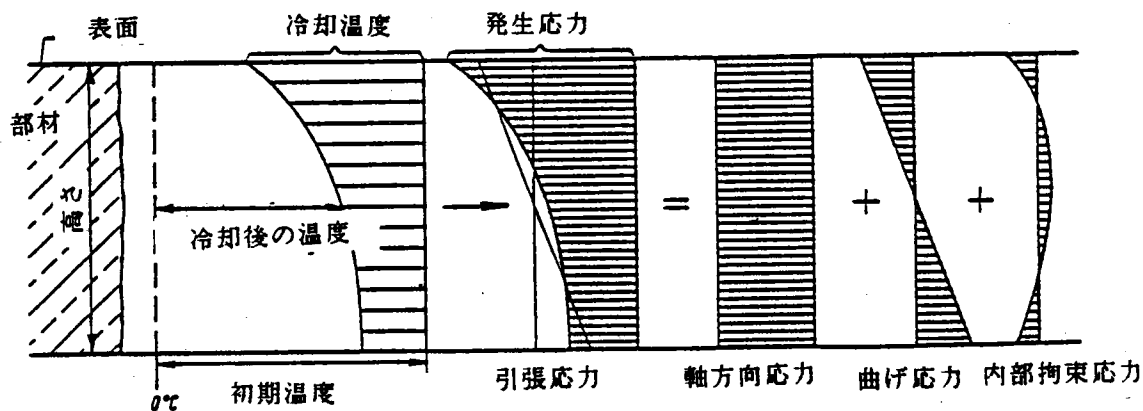


図-5.5 拘束応力の分割

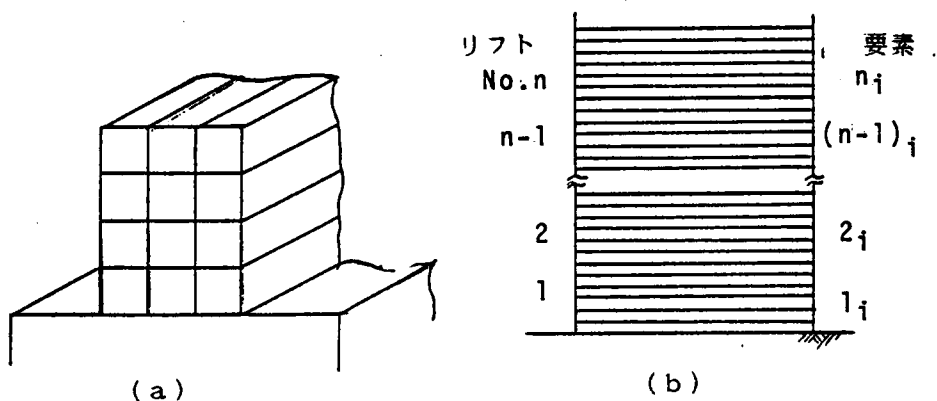


図-5.6 高さと厚さの比が小さいとき、および積層打設の場合のモデル化

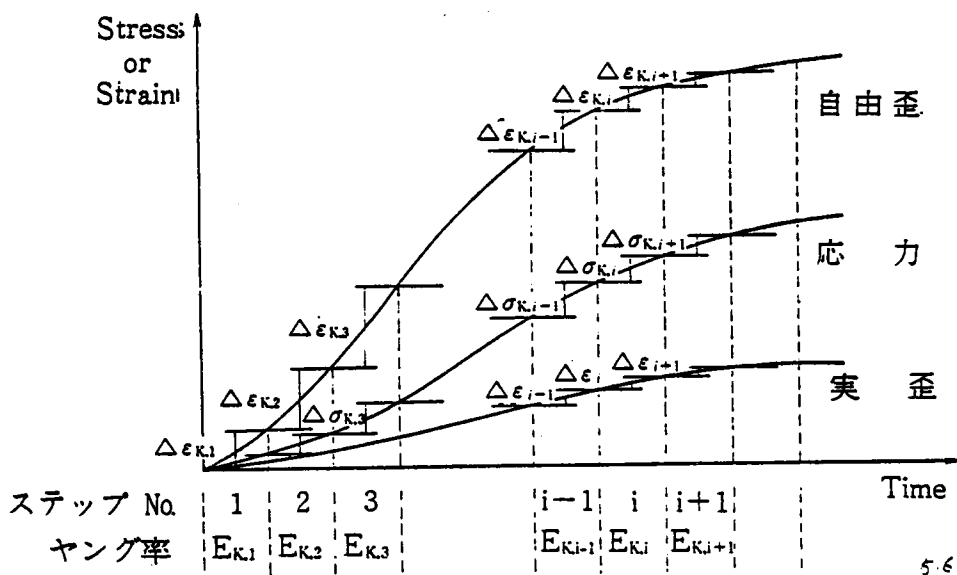


図-5.7 逐次計算における時間分割

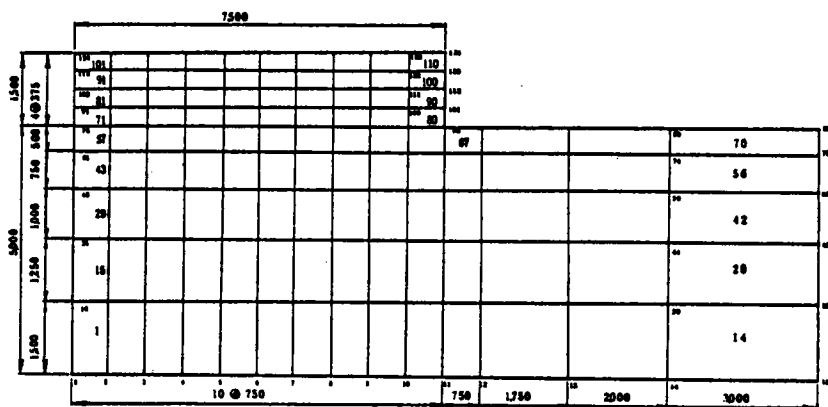


図-5.8 対象モデルの要素分割

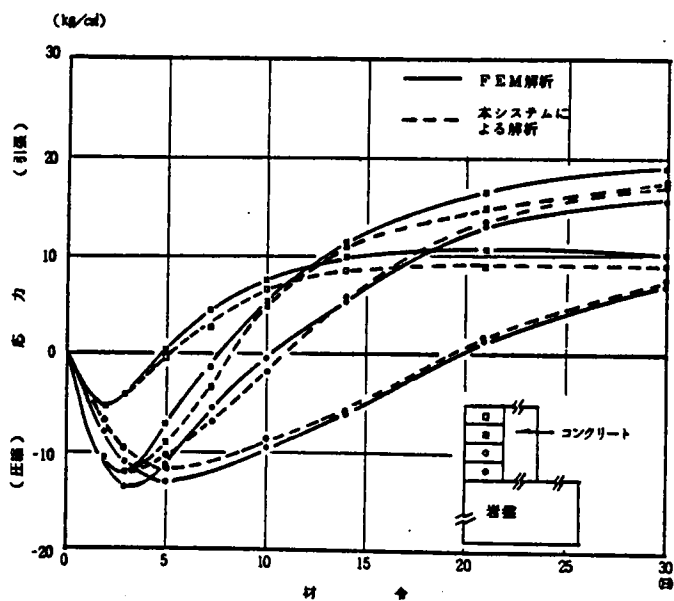


図-5.9 応力解析結果の比較

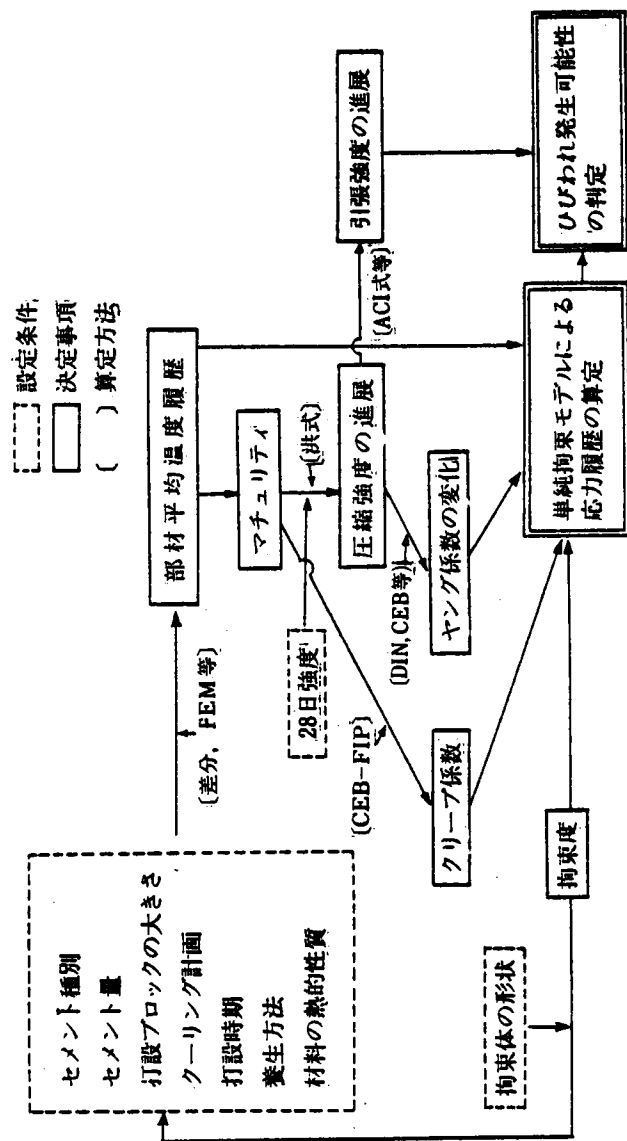


図-5.10 拘束応力の計算とひびわれ予測システムの構成

表-5.1 熱的性質, 力学的特性

項 目	単 位	地 値	コンタリート
熱伝導率 (k)	cal/cm·hr·°C	0.0194	0.025
比 熱 (C)	cal/g°C	0.25	0.3125
比 重 (ρ)	g/cm ³	0.0026	0.00232
熱伝達率 (h)	cal/cm ² ·hr·°C	0.001	
発 熱 量 (Q)	cal/cm		$q = K \cdot C \cdot \rho \cdot a \cdot e^{-a \cdot t}$ $T = K(1 - e^{-a \cdot t})$ K: 310 a: 0.56
熱膨張率 (α)	1/°C	10×10^{-6}	10×10^{-6}
ポアソン比 (ν)		0.2	0.167
弾性係数 (E)	g/cm	10^5	$E(t_0) = \frac{10}{A+B \cdot t_0} \times 10^4$ $\langle t_0 \rangle = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^3 (T_i + 10) \rangle$ A: 0.11997 B: 0.02496
初期温度 (T ₀)	°C	上面 20 : 下面 15 の温度分布	20.0
外周温度 (T _H)	°C	20.0	

第6章 マスコンクリートにおける熱応力に及ぼす外部 および内部拘束の影響に関する研究

6.1 研究目的

マスコンクリートに発生する熱応力を直接的に測定することは、基本的な発生メカニズムを明らかにしたり、計算法を検討するために、大きな意義を有するものである。カールソンひずみ計に代って有効応力計が使用されるようになってから、数多くの構造物の直接的な応力測定例がみられるようになってきた。

しかし、これら実構造物での測定では応力発生の基本事象を観測したり、計算法の妥当性を確認する上では、多くの諸要因が錯綜しているために適当とはいえない。

すなわち、観測結果が予測値と合致しなかった場合、計算に取入れにくい対象物の形状、施工条件に起因するものであるか、計算法に本質的な問題があったのかが、一般には不明確である。

このようなことから、多くの計算法の妥当性は単純な方法で検証されているべきと思われる。しかし、数多くの研究の中で夏目らが行った研究以外にはほとんどみられない。P. Nischer は拘束試験装置を提案しているが、材料や施工条件の評価に用いているにすぎない。

このような観点から、できるだけ単純な実験室的方法で熱応力を評価することを試みた。ここでは、外部拘束応力および、内部拘束応力を各々実験的に求める方法を提案すると共に、これを用いて基本的な応力発生過程を明らかにし、前章で提案した単純拘束モデルによる計算法の妥当性について検討することを目的として本研究を行った。

6. 2 外部拘束応力に関する実験的研究

6. 2. 1 実験概要

マスコンクリートの外部拘束による応力発生のメカニズムを実験的に明らかにするために室内実験装置を考察した。

次にこの装置を用いた実験を行い、応力発展・過程の特性について考察するとともに、前章で提案した解析方法の妥当性を検証することを行った。

コンクリートの種類として、普通セメント(NP)、中熱セメントコンクリート(MP)の2種に、各々練上り温度を2種変化させ、4種のコンクリートの応力履歴を追跡した。

実験に使用したコンクリートの配合を表-6. 1に示す。後述のように種々の考察を加える上で材料定数を明確にしておく必要がある。このため、型枠の脱型が可能な材令約8時間からのコンクリートの圧縮、割裂引張強度、曲げ強度およびヤング係数の経時変化を測定した。

6. 2. 2 測定原理および装置

外部拘束の単純な形式は軸拘束であり、かつ拘束体が弾性体である場合である。古くから収縮応力については鋼材を用いた拘束実験が行われており⁽¹⁾ マスコンクリートにおいても原理的に適用が可能である。しかし、マスコンクリートでは被拘束体が実際と近い熱伸縮挙動を示す必要がある。実大部材を用いるには規模的に大きくなることから、コンクリートを温床線等で加熱したり、特殊鋼を用いた拘束装置を用いたり⁽²⁾⁽³⁾ (図-6. 1参照)、断熱材で覆うことが考えられる。装置的に簡便であり、かつ部材内の温度差も少ないことおよび乾燥が防止できるという点からは断熱材の使用が考えられる。予備実験および計算から $20 \times 20 \text{ cm}$ の断面を有する部材でも、 10 cm 厚の発泡スチロール断熱材で周囲を覆うことにより、約 20°C の水和熱による温度上昇があり、熱伸縮による応力変化を追跡できる見込みが得られた。コンクリートに生じる応力は鋼材のひずみから作用する力を求め、すべりがなければ力のつりあいが成立することから求めることができる。

以上のようなことから、図-6. 2に示すように、断熱材で囲まれた中心部 20×20 、端部 $40 \times 40 \text{ cm}$ の断面を有する亜鈴状のコンクリートを打設し、これを鋼材で拘束する外部拘束測定装置を考えた。鋼材とコンクリートとのすべりを防止することが重要であるが、このために端部の接触面積を大きくするとともにすべり止め筋を配置し、かつボルトにより接触面に垂直応力を付加し、摩擦による抵抗力を増した。

温度測定はC-C熱電対をコンクリート部に埋設することにより行った。また、鋼材には偏心力が作用するので、多くの（本実験では約20点）電気抵抗線ひずみ計を貼布することとした。

本実験では拘束度の影響について考察するため、図-6.3に示すように、鋼材に3種の型鋼を用いて、拘束度を変化させることとした。

材令28日のコンクリートのヤング係数を用いて、軸剛性比から(5.1)式により拘束度を求めると、各々について0.16, 0.38, 0.71となった。

実験では外気温の変動に伴う付加応力の影響をできるだけ避けるため、実験室内で行い、コンクリート温度が室温とほぼ平衡に達する材令14日まで温度およびひずみの計測を行うこととした。

6.2.3 試験結果および考察

(1) 材料定数に関する検討

(a) マチュリティと圧縮強度の関係

図-6.4に普通および中腐熟コンクリートの圧縮強度の進展率を積算温度の対数軸を横軸に示す。図中には洪による提案式⁽⁴⁾をも併せて示した。実測値は各々、初期材令から一つの曲線上にあることがわかる。この曲線は一点鎖線のように、2本の直線でも近似しうることを示している。洪式との比較では、早期にややずれがみられるものの、比較的良い対応を示していることがわかる。

解析では試験数も少ないことから基本的には洪式を用いることとした。ただし洪式ではマチュリティが20以下では適用が不可能となる場合もあることを考慮して、30以下では図の破線に示すような補正を行なった。

(b) 圧縮強度とヤング係数の関係

拘束応力の算定に寄与するヤング係数の影響は大きく、このために各材令におけるヤング係数をできるだけ正確に推定する必要がある。図-6.5にACI、その他の基準値と実験結果を示す。これによると①極く初期材令を含めて一つの曲線上にあること、②セメント間の差はないとみなせることがわかる。

ACI式は他の基準値と比較してヤング係数を低く見積っており、拘束応力を過少評価する傾向にあるといえる。実験結果はCEB-FIPまたはDIN-1045によるものが比較的よい対応をみせている。また若材令期まで連続性が認められる。実験結果を回帰分析した結果、次の関数型が得られたので、後述の拘束実験での計算にはこの式を用いることとした。

$$E_c = -2.72 - 38.4 \log \sigma_c + 72.1 (\log \sigma_c)^2, (\times 10^3) \quad \text{----- (6.1)}$$

(c) 圧縮強度と引張強度の関係

図-6.6に圧縮強度に対応する割裂引張強度の実測値とACI 207委員会の提案式を示す。上記と同様に、引張強度と圧縮強度の間にも比較的若令期まで連続性が認められる。ACIでは、コンクリート表面の乾燥状態によって図に示すように変化させている。マスコンクリートでは全体として乾燥されにくいことを考慮すれば、 $1.78 \sqrt{\sigma_c}$ を用いてもよいと思われるが、本実験結果と対比した場合初期強度を過大に評価していることになる。本検討では、図中に示したbi-linearな直線関係を用いることとするが、熱応力のように載荷速度が小さい場合には、実験室で行なった引張試験で得られる強度よりも低下することがあり、実際のマッシュな部材のひびわれ発生の限界を定める場合には、検討が必要と思われる。

(2) 温度測定結果

図-6.7に拘束部の中心部で熱電対により測定した温度履歴を示す。セメントの種別および練上り温度によって異なるが、15~20℃の温度上昇が生じており、本測定方法でもマスコンクリート部材を模擬した温度変化を与えられることがわかる。

なお、断熱材の近くと、中心部では温度差がなかったが、定着部に近い箇所では温度上昇が少なく、温度応力の計算値を求める場合は熱電対を分散させて被拘束体の平均温度を求める必要がある。

(3) 応力測定結果とその考察

コンクリートに生じた温度応力 σ_c は、鋼材のひずみの測定値 ϵ_s が得られているので、力のつりあいから次式で求めることができる。

$$\sigma_c = - \frac{A_s}{A_c} E_s \epsilon_s \quad \text{----- (6.2)}$$

このようにして求めた、温度応力の測定結果の例を図-6.8~6.9に示す。また表-6.2に各試験体の圧縮、引張応力の最大値を示す。

これらの図表によると初期に圧縮応力が作用するが、温度降下と共に引張応力が作用するようになり、材令 7 日でほぼ平衡に達している。

初期圧縮応力は本試験では最大 7 kg/cm^2 と比較的小さいが、温度上昇値および最大温度上昇を示す材令が小さいことに起因すると思われ、寸法の大きいダムやベースマット状の実構造物では無視することができないものと考えられる。

ひびわれ予測式の中で、初期にはヤング係数が小さく、クリープによる応力緩和も大きいと考え、温度降下量のみで拘束応力の評価を行っているものもみられるが、安全側すぎるものと考えられ、初期圧縮応力をも評価すべきことがわかる。

またこれらの図より拘束度が大きくなるほど、いずれの配合でも応力が大きくなるが、必ずしも比例してはいないことがみられる。これは発生応力が大きくなると、クリープの応力比例則が成立しないことによるとと思われる。

現状では非線型クリープを取り扱った解析は、データも不足であり、かつ解析方法も繁雑であることから困難である。応力計算上では、過大に応力を評価することになるが、第 2 章で述べたように持続応力下では引張強度も低下すると思われることから、ひびわれ予測の上では実用上は大きな問題ではないとも考えられる。

ひびわれは拘束度を最大としたいずれの試験体でも発生した。拘束度の大きいときには観測されるひびわれが小さいこと、および測定器の不調により、試験体 MP-30、NP-30 のみしか発生応力は測定されなかったが、ひびわれ発生時の応力実測値と引張、曲げ強度と比較して、表-6.3 に示す。これよりひびわれ発生条件を考える上では、積算温度を考えたときの割裂引張強度と比較的良好な対応を示していることがわかる。

(4) 計算値との対応とその考察

実測したコンクリートの平均温度履歴や材料定数の測定結果を用い、前章に示した単純拘束モデルによる計算法を用いて、各試験体に作用する拘束応力を計算した。但し、計算値を求める場合、実験室内温度が必ずしも一定に制御できなかったため、コンクリートの温度変化としては平均温度と室温（鋼材温度）との差を用いた。

図-6.10、図-6.11 に計算結果の一例を示すが、実測した結果である。図-6.8、6.9 とこれらを比較すると、それぞれよい対応を示していることがわかる。図-6.12 には、実測応力と計算応力の関係を各試験体ごとに示した。これによると応力の推定精度はセメントの種類、打設温度および材令による差異はあまりみられず、全体を平均すると実測応力は計算応力の約 90% であった。

しかし拘束度について $R=0.16$ と $R=0.38$ を比較すると、 $R=0.38$ の方が明らかに推定精度が低下していることが認められる。この原因の一つとしては、クリープは応力に比例すると仮定しているが、引張強度の60%を超える応力が発生した場合には比例限を越え、かなり応力緩和が大きくなることが考えられる。⁽⁵⁾

ひびわれの発生についてみると、実測の結果では $R=0.71$ の試験体ではすべてひびわれが発生し、 $R=0.16$ のものにはひびわれは発生していないが、これは計算結果と一致している。しかし $R=0.38$ の試験体ではひびわれの発生は認められなかったが、計算では $NP-30.0$ の試験体のものだけ、引張強度を約 5 kg/cm^2 程度越えた応力が発生していた。しかしひびわれの発生がみられた $R=0.71$ の試験体においては、計算上で引張強度を越えた応力が発生した時点と実測時期とは若干時間的なずれがみられるものの、比較的良く一致している。

以上のようにクリープの取扱いや引張強度のとり方にはなお検討すべき問題が残されているが、ひびわれ発生の限界に若干の幅をもたせれば、現状でも第5章に示した応力算定方法は十分実用に供しうるものと考えられる。

6. 3 内部拘束応力に関する実験的研究

6. 3. 1 実験概要

前章において、内部拘束応力を含めたマッシブな部材に生じる応力の計算方法を示したが、その妥当性について実験的に検証しておく必要がある。しかし、内部拘束応力を精度よく測定することは非常に困難な現状にあり、ある程度の誤差を伴うことは避けられない。ここではこの点を前提とした上で、次の二つの方法でマッシブな部材に生じている内部拘束応力を実験的に求めてみることにした。

方法(A)：コンクリート部材に内部拘束応力および外部拘束応力を同時に生じさせる。このうち後者は先に示したように、拘束材である鋼材のひずみを測定することによって求めることができる。ひびわれが生じたときその材令における引張強度が、部材内に生じている最大の内部拘束応力および外部拘束応力の和であると考え、引張強度と外部拘束応力は既知であることから、ひびわれ発生時に生じていた内部拘束応力を推定することができる。

(6), (7)

方法(B)：最近用いられるようになってきた有効応力計を埋設し、内部拘束応力を求める方法。有効応力計としては東横エルメス機製（GK-200）を用いることとした。（図-6.13参照）

なお、実験に用いた材料、配合は6.2と同一である。

6. 3. 2 測定装置

(1) 試験体

先に示した方法(A)によって内部拘束応力を求める場合の試験体拘束装置および断熱方法を図-6.14に示す。コンクリート試験体は、亜鈴状のもので端部の断面は、 30×45 cm、中央部の断面は厚さ10 cm、高さ45 cmとした。この中央部の両側面には厚さ10 cmの断熱材を設置し、厚さ方向の熱の拡散を防止した。また図-6.14のA-A断面図に示したように、試験体の高さの中央部で、試験体両側部の、試験体と断熱材の間に温床線を配置し、後述する温度制御装置を用いて温床線に通電し、試験体の温度分布が中央部で最大、放熱面である上下面で最低となるようにした。このようにして放物線分布に近い温度分布を、コンクリートの打設直後から与えられることからマスコンクリートに生じる内部拘束応力を比較的小型の試験体に生じさせることができる。

また、試験体には、平均温度の経時的な変化に伴い伸縮ひずみが生じるが、これに対しては、前の実験で用いたのと同様の方法で鋼材により拘束することとした。拘束鋼材には二種類の型钢を用いた。拘束度Rを材令28日のコンクリートのヤング率 E_{c28} を用いて $R = 1 / (1 + A_c E_{c28} / A_s E_s)$ で求めると、これらの二種類の鋼材による試験体の拘束度は、0.45、0.69となる。

コンクリートに生じている外部拘束応力を求めるために鋼材の中央部に、12枚のワイヤストレンゲージを貼布し、鋼材に生じるひずみの変化を測定した。

方法(B)で有効応力計によって内部拘束応力を求める場合の試験体は、図-6.14に示したもののから端部のふくらみおよび拘束鋼材を除去した壁体である。これを図-6.15に示す。壁体の長さは高さの4倍とし、端部の応力解放部を除いても中央部で様なひずみ領域が十分確保できるように配慮した。

(2) 温度制御および測定方法

試験体の中心部に、実際のマスコンクリート部材に近い温度履歴を与えるために、図-6.16に示す温度制御装置を用いた。制御方法は次の通りである。

まずドラム式のプログラム設定器で、試験体中心部に与える温度履歴を設定しておき、この温度と試験体中心部に埋設した測温抵抗体により検出された温度との比較を電圧変換して制御を行なう。試験体の温度の方が設定温度よりも低い場合には、その差に比例した電流を、試験体側面に配置した温床線に通じ、試験体を加熱する。温度差がなくなると送電が中止される。試験体中心部における制御された温度は、制御装置に付属した温度記録計に記録されるが、試験体の長さおよび高さ方向の温度分布および経時変化は、別に埋設した銅-コンスタンタン熱電対により測定した。

中心部に与える温度は、実際のマスコンクリート部材に生じる温度履歴を模擬し、材令2日で最高温度を示し以後徐々に降下させるものとした。最初に行った温度履歴Aでは最高温度を60℃、恒温室内の温度と平衡に達する材令を10日とした。しかし、内部拘束によるひびわれが見られなかったため、温度履歴Bでは最高温度を70℃とさらに高めることとした。

試験は恒温室内で行ったが、中心部と表面部の温度差をできるだけ高めるために、室内温度は10℃とした。

6. 3. 3 試験結果および考察

(1) 温度

温度履歴Bを与えたときの各測点の温度履歴および温度分布を図-6. 17に示す。前述の制御装置により設定した温度履歴が中心部で得られ、またその分布は放物線に近いものが得られていることがわかる。材令2日においては、中心部と上下面との温度差は33℃となり、実構造物でもかなりマッシブな部材に相当する大きな温度差が得られている。

(2) 内部拘束応力

方法(A)に基づく場合の測定結果の例を図-6. 18, 19に示す。図中の破線は鋼材に貼布したゲージのひずみ測定値から求めた外部拘束応力の測定値を示す。また引張強度は、前に示した引張強度の進展の実測結果に、積算温度の概念を導入して、温度上昇による強度促進効果を加味したものである。

外部拘束応力は、温度上昇時に圧縮応力が生じ、温度降下に伴って引張応力が作用することが認められる。また図-6. 18の場合には材令6. 8日で、図-6. 19の場合には材令6. 1日で応力が解放されており、目視によると、高さ方向に貫通するひびわれが発生したことが認められた。この時の内部拘束応力の最大値を引張強度と鋼材のひずみから測定した外部拘束応力の差として求めると図-6. 18の場合で14. 0 kg/cm²、図-6. 19の場合で8. 0 kg/cm²となる。表-6. 4に各供試体のひびわれ発生時の材令および方法(A)で推定した拘束応力を示す。ひびわれ発生時期は、拘束度の高いものほど早いのは、当然であるが、温度履歴AとBを比較した場合に、ピーク時温度および温度差ともに小さいAの方がひびわれの発生が早いのは、温度降下速度が大きいことに起因しているものと考えられる。

内部拘束応力を上述のような方法によって推定しているために、ある程度の誤差が含まれている点を加味しなければならないが、表-6. 4の結果より、本実験の場合で材令1週における拘束応力は10~15 kg/cm²程度と考えられ、外的な拘束度が小さい場合には、外的な拘束応力と同程度の内部拘束応力が生じることになり、ひびわれを予測するうえで、無視できないものと考えられる。

図-6. 20, 21に外的な拘束を加えないモデルにおいて、中心部、表面部およびこれらの中間部の3ヵ所で有効応力計により測定した内部拘束応力の経時変化を破線で示す。これによると、表面部は温度上昇時には引張応力が作用しているが、温度降下に伴って圧縮応力に転じていることが認められる。逆に中心部では圧縮域から引張域へと移行している。この点は、表面部で引張応力が、中央

部で圧縮応力が常に作用するとされてきた従来の概念とは異なるものである。この原因は次のように考えられる。すなわち、温度上昇時には表面部で引張応力、中心部で圧縮応力が生じるが、このときにはヤング率も小さく、またクリープによる応力緩和度が高いために生じる応力は比較的小さい。温度降下時には、ヤング率も次第に大きくなり、また通常の場合、中心部の温度降下量の方が、表面部よりも相対的に大きいために、中心部で引張、表面部で圧縮の比較的大きな応力が生じるものと考えられる。

通常のマッシブな構造物では外的な拘束が支配的と思われる縦方向のひびわれが発生し、壁体の構造物においては貫通している場合が多い。ひびわれ深さが浅い表面部のみに生じているひびわれは、上記の結果から判断すると温度上昇時に生じているか、あるいは温度降下時に外気温の日間変動等により急激に表面部が冷却されたときに生じるものと考えられる。

しかし、温度上昇時には外部拘束によって圧縮応力が発生しているため、内部拘束による引張応力は、外部拘束による圧縮応力と相殺される方向に行くこと、および今回の実験で中心部と表面部に33℃というかなり大きな温度差を与えたにもかかわらず、ひびわれの発生は認められなかったことを考えると、温度上昇時に表面部に生ずる内部拘束による引張応力はあまり問題ではなく、むしろ、表面部に生じるひびわれを防止するという意味では、温度降下時に外表面が急激に冷却されるのを避けるようにすることの方が重要であるものと考えられる。

有効応力計を用いた内部拘束応力の測定については、精度向上のために検討すべき点も残されており、定量的に評価することには限界があるものと考えられるが、本実験程度の温度履歴を与えた場合に、初期には表面部で引張応力が生じ、温度降下時には中央部で引張応力が生じており、その値は、10 kg/cm²程度と考えられる。

(3) 計算値との対応

実験において得られた温度履歴、材料定数、拘束度等を第5章に示した方法にインプットして求めた拘束応力の計算値を図-6.18~6.21の実線に示す。

まず図-6.20, 21は内部拘束応力のみが生ずる場合であるが、計算値と実測値は比較的よい対応を示しており、また計算結果でも表面部、中心部において応力の反転がみられる。図-6.18, 6.19において、実測した外部拘束応力と計算値とは比較的良好に一致している。また中心部における内部拘束応力と外部拘束応力との和が引張強度を越えるときとして計算から求めたひびわれ発生時の材令は、図-6.18で6.3日、図-6.19で7.2日であり、これは実験でひびわれが実際に認められた材令6.8日および6.1日と比較的良好に一致している。

致している。

表－6．4に計算により予測したひびわれ発生日と実験で観測されたひびわれ発生日との比較を示しているが、両者はいずれの場合も比較的よい対応を示していることがわかる。

以上のことから、第5章で示した計算方法は、実験で認められた挙動を説明するものであり、クリープ等の設定にいくつかの仮定を含むものの、マスコンクリートのひびわれ予測の実用に供しうるものと考えられる。

6. 4 結語

本章で得られた主要な結論は次の通りである。

- (1) 外部拘束応力を実験室で求める方法として、鋼材と断熱材で囲まれたコンクリートより成る装置を提案した。コンクリートはマスコンクリートを模擬した温度履歴を示すことから、本研究のように計算方法の妥当性を検討することに使用できる他、材料や施工法のひびわれ発生に与える影響を追跡する上で、有効な方法と思われる。
- (2) 2種のセメントを用いたコンクリートの初期材令からの、圧縮、引張強度、ヤング係数等を測定し、これらの関係を検討した。この結果、積算温度から圧縮強度を求め、これから引張強度やヤング係数を推定する第5章での方法が妥当であることが確認できた。
- (3) 外部拘束を受ける場合、初期に比較的大きな圧縮応力が作用し、ひびわれ発生を予測する上で無視できないことが明らかとなった。
- (4) 温度履歴が同一の場合、発生応力は拘束度が大きくなるほど大きくなるが、必ずしも比例はしないことがわかった。
- (5) 第5章で示した方法で求めた応力の計算値と実測値は、前者がやや大きいもののよい一致を示し、応力評価方法として適用しうることが立証できた。
- (6) ひびわれ発生限界条件として、硬化促進を加味した引張強度と発生応力の対比で考える強度限界条件が妥当であることが明らかとなった。
- (7) 実験において、最大33℃の内外温度差を与え、内部拘束応力を発生させたが、ひびわれは表面部においても観測されなかった。このことから、内部拘束応力のみでは実構造物において、表面部に潜在的な損傷を与えることはあっても過大なひびわれが生じることはないと思われた。
- (8) マスコンクリートの不均一温度分布による内部拘束応力は表面部で初期に引張応力が生じるが、温度降下時には圧縮応力に転じることがわかった。また逆に中心部でも引張応力が作用することが認められた。このことから、表面部のみで引張応力が生じるとした計算法には問題があり、基本的には増分法による応力評価を行うべきことが明らかとなった。

- (9) 第5章に示した方法による計算値と測定値は、内部拘束が生じた場合にも妥当であることが明確にできた。
- (10) 本実験で与えた温度履歴によって生じる内部拘束応力は $10\sim 15\text{kg/cm}^2$ と推定された。一般の内、外部拘束を受ける部材においてひびわれを予測する場合、内部拘束応力を無視できないことがわかった。

【参考文献】

- (1) 鈴木他：コンクリートの収縮ひびわれ試験，日本建築学会学術講演梗概集，
pp. 179-180, 昭和51年10月
- (2) R. Springenschmid und P. Nischer : Untersuchungen über die Ursache
von Querrissen im Jungen Beton, Beton-und Stahlbeton bau,
pp. 221 ~ 226, 9, 1973
- (3) 山崎：マスコンクリートのひびわれシミュレーション実験，日本建築学会
学術講演梗概集, pp. 161- 162, 昭和51年10月
- (4) 洪，長島：寒中コンクリート， 技術書院，昭和43年
- (5) 例えば，野中：普通ポルトランドセメントコンクリートの温度ひびわれ
発生に關与する諸物性について，農業土木学会論文集，第91号，
pp. 51-58, Feb. 1981
- (6) 崎本他：水和熱によって発生する鉄筋コンクリート壁体の温度応力について，
マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに關するコロキウム論文集，
pp. 105-112, コンクリート工学協会，1982.9
- (7) 田辺他：マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリ
ートの外部拘束効果，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに關する
コロキウム論文集，pp. 83-90, 日本コンクリート工学協会，1982.9

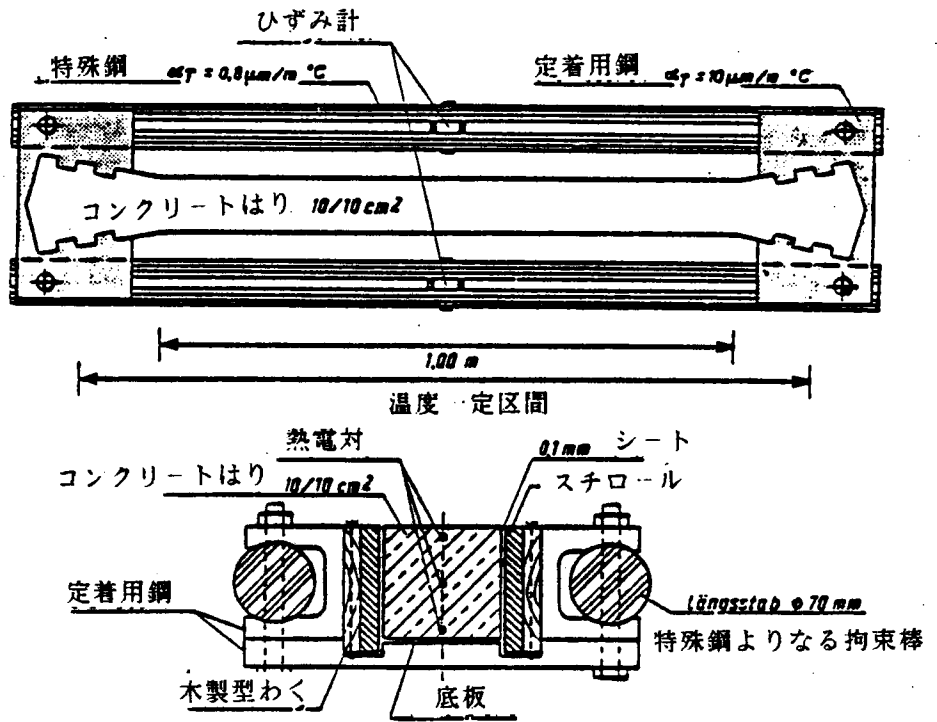
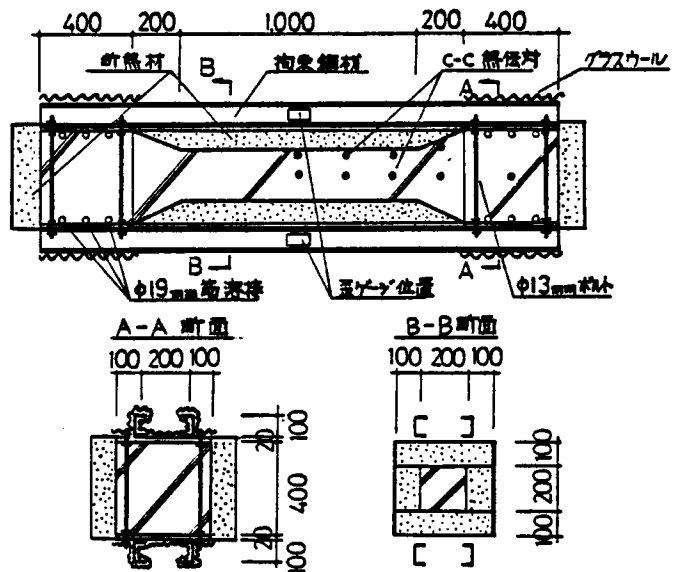


図-6.1 特殊鋼を用いた拘束装置



単位： mm

図-6.2 拘束実験装置

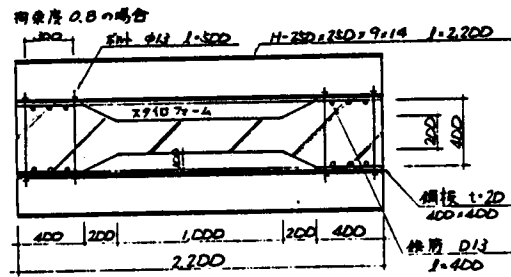
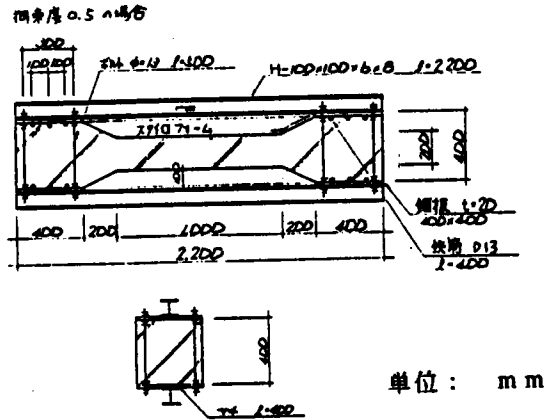


図-6.3 拘束度を変化させた場合の実験装置

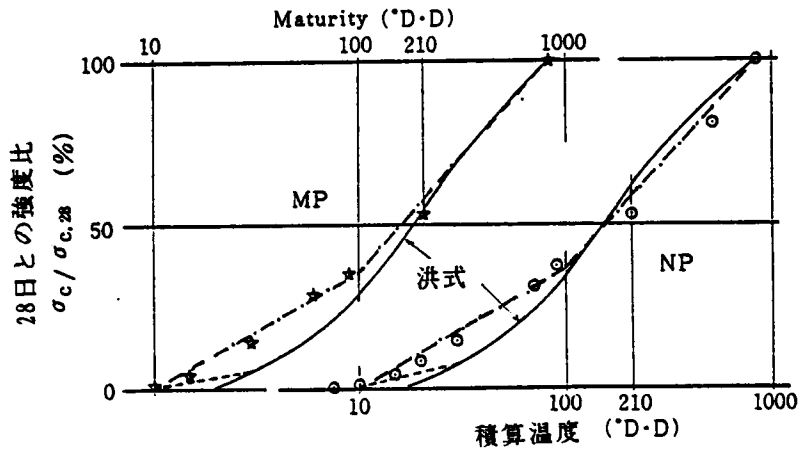


図-6.4 マチュリティと圧縮強度進展率

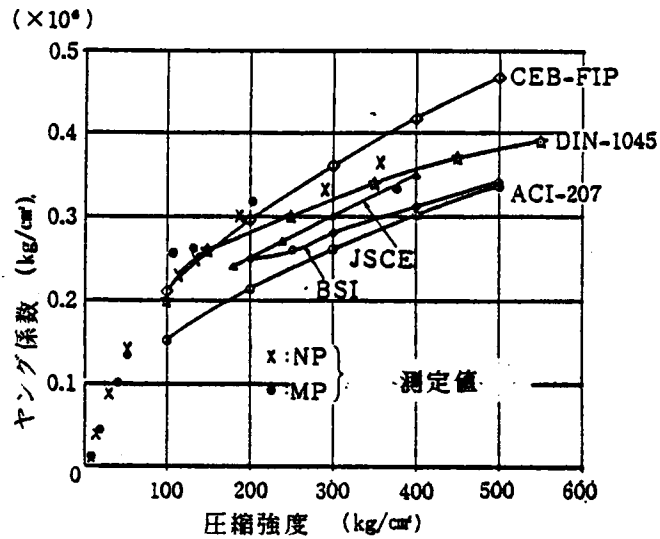


図-6.5 圧縮強度とヤング係数の関係

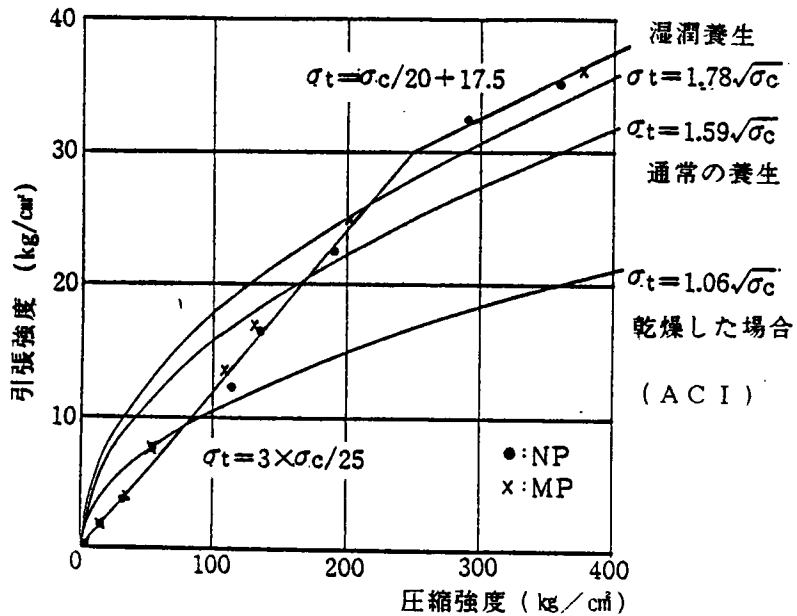


図-6.6 圧縮強度と引張強度との関係

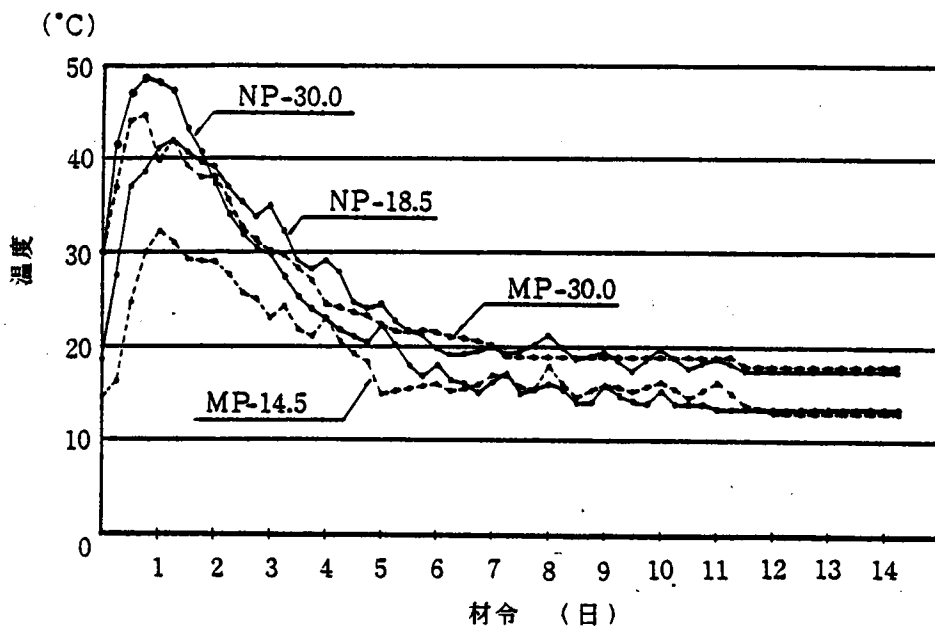


図-6.7 実測平均温度履歴

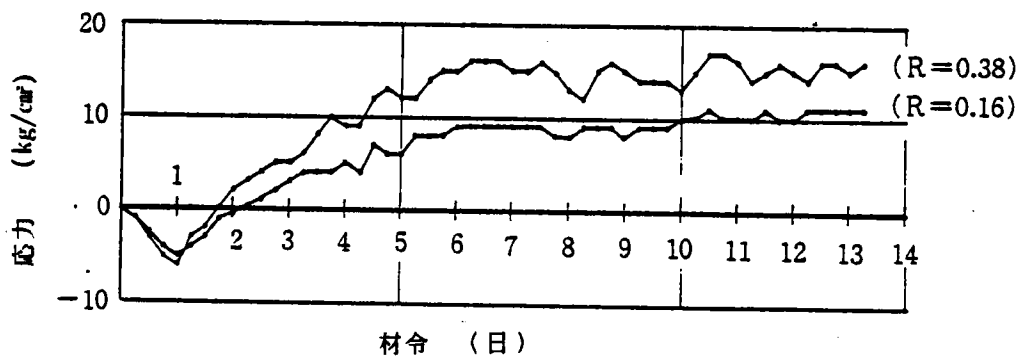


図-6.8 拘束応力の測定結果例 (NP-18.5)

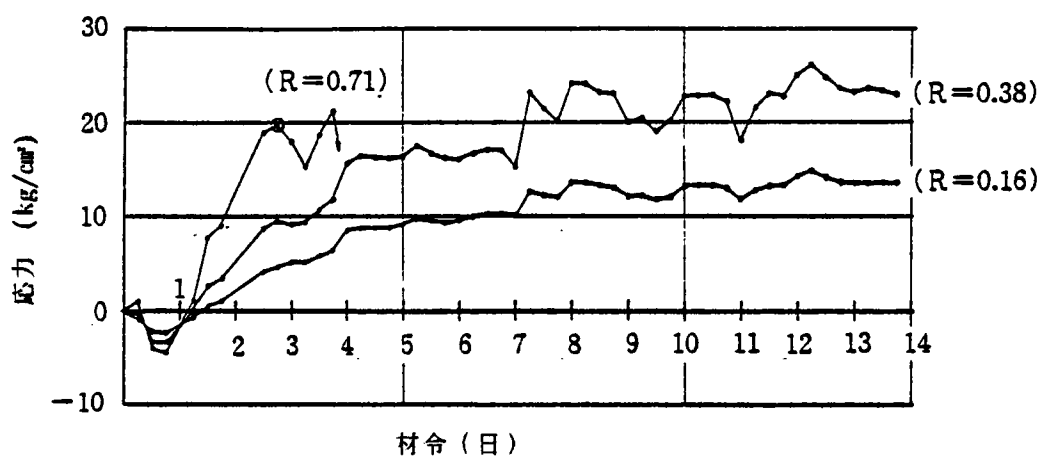


図-6.9 拘束応力の測定結果例 (MP-30.0)

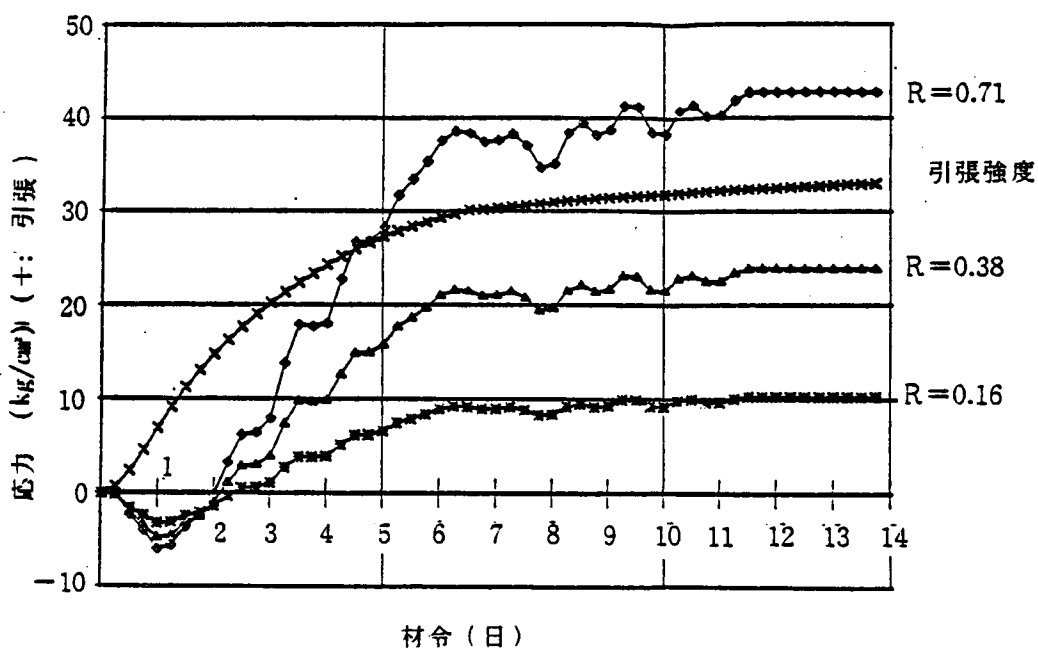


図-6.10 拘束応力計算例 (NP-18.5)

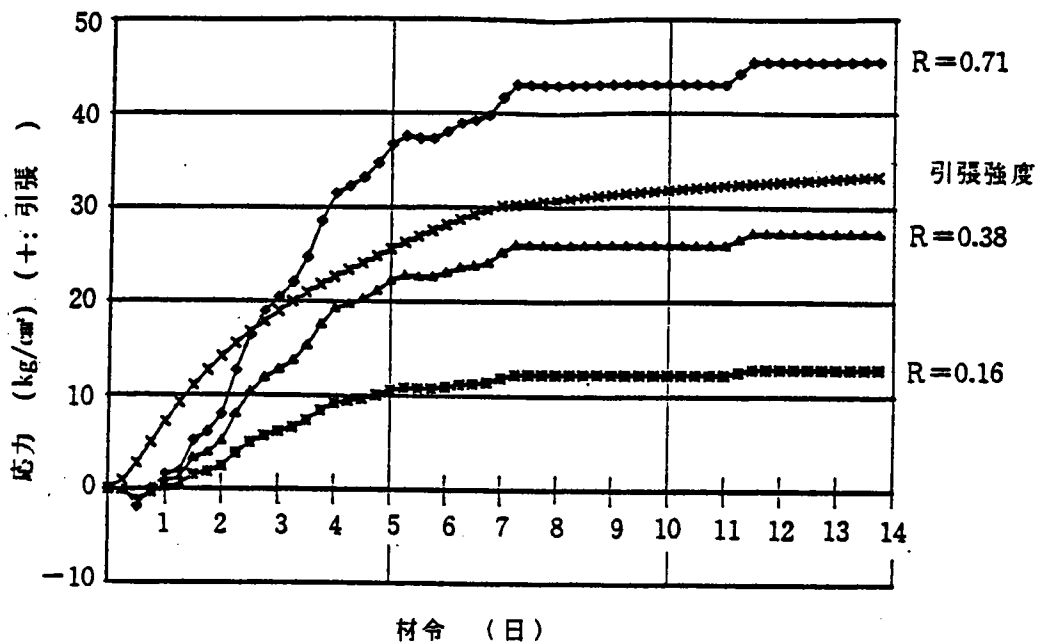


図-6.11 拘束応力計算例 (MP-30.0)

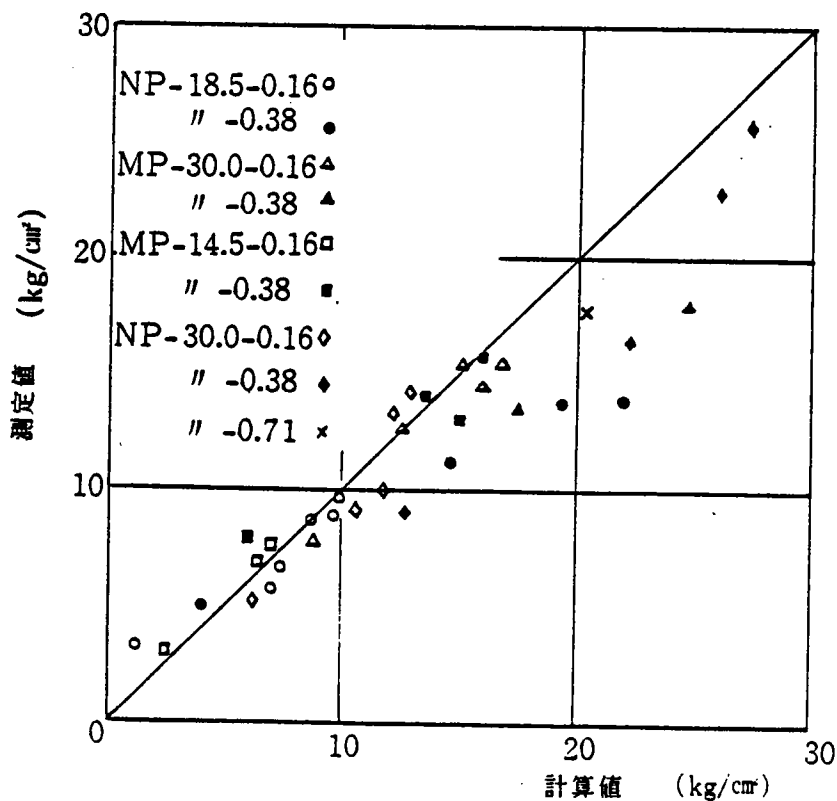


図-6.12 実測応力と計算応力の比較

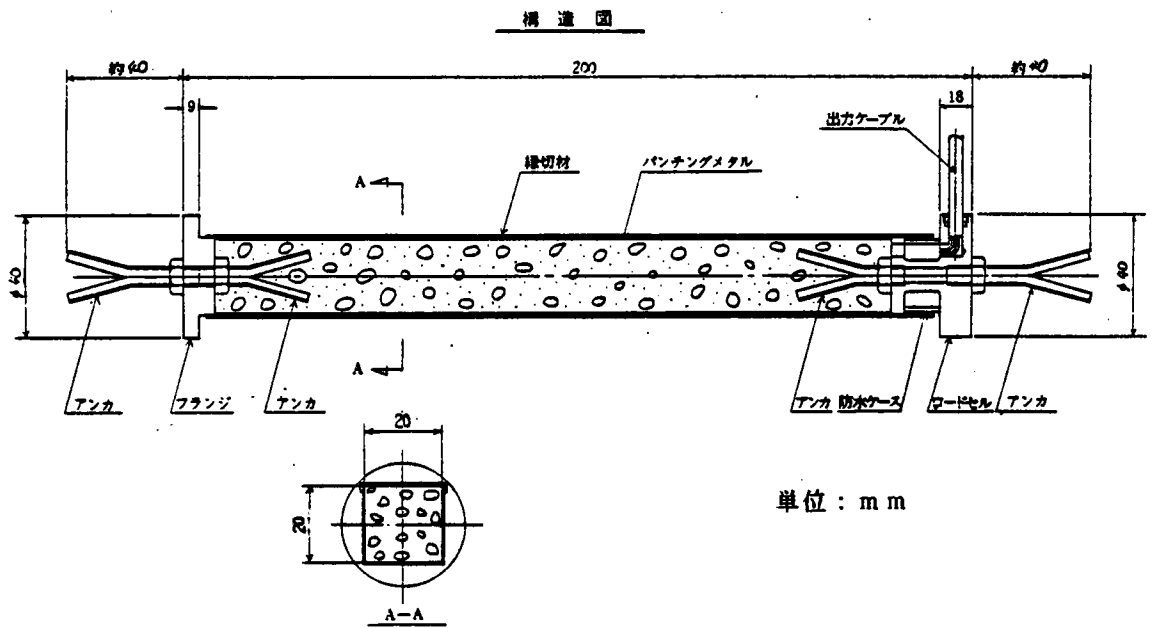


図-6.13 実験に使用した有効応力計

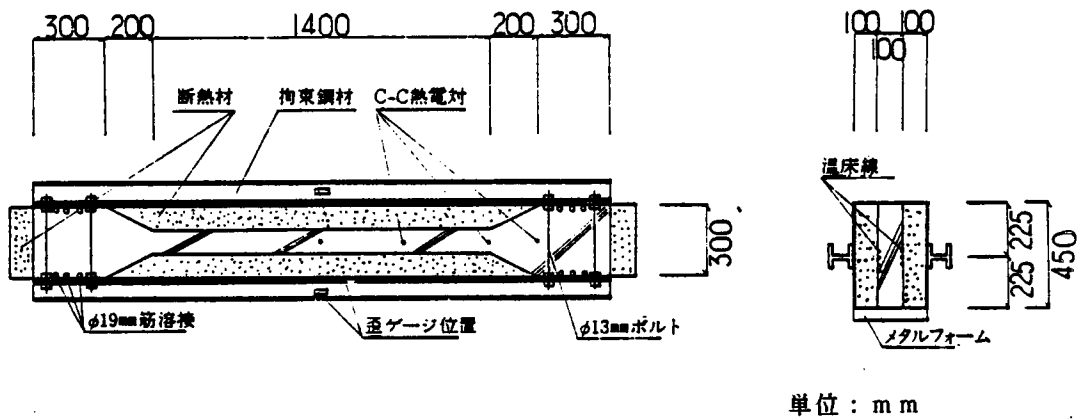


図-6.14 内部拘束応力試験法 (A)

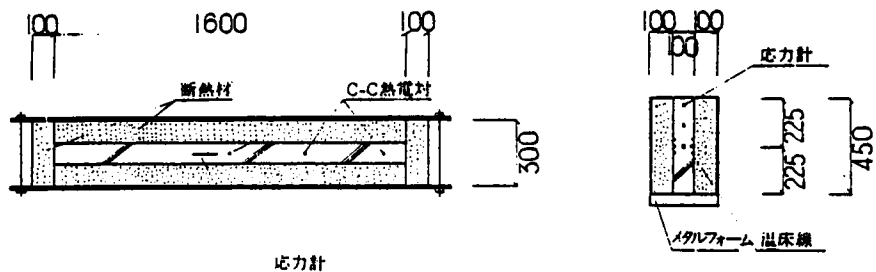


図-6.15 内部拘束応力試験法 (B)

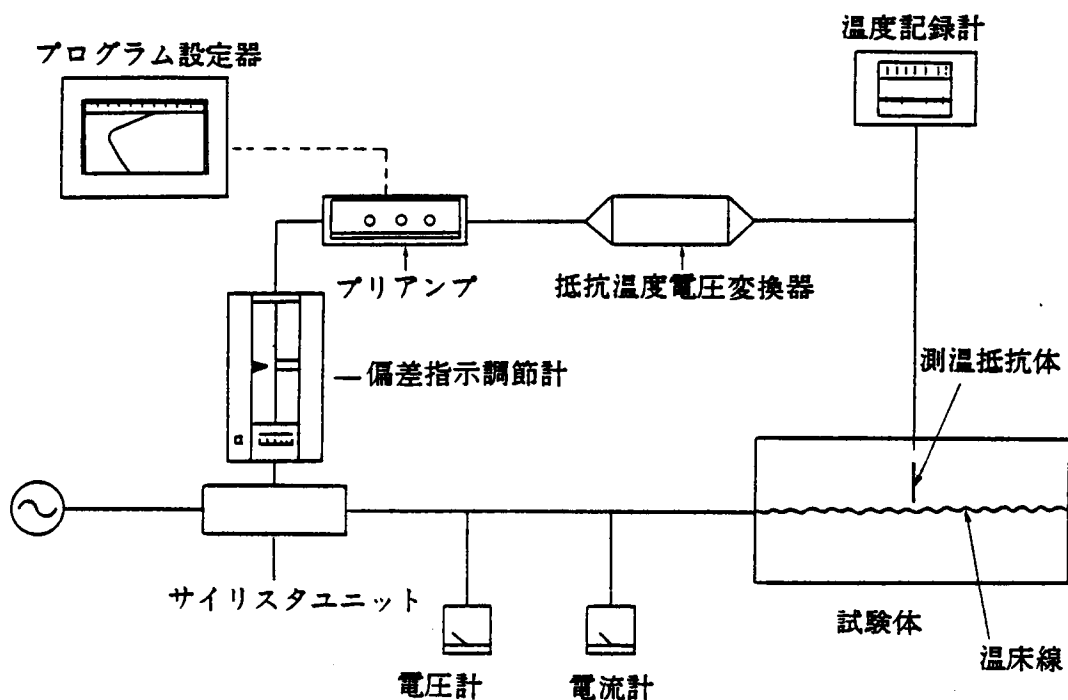


図-6.16 温度制御装置

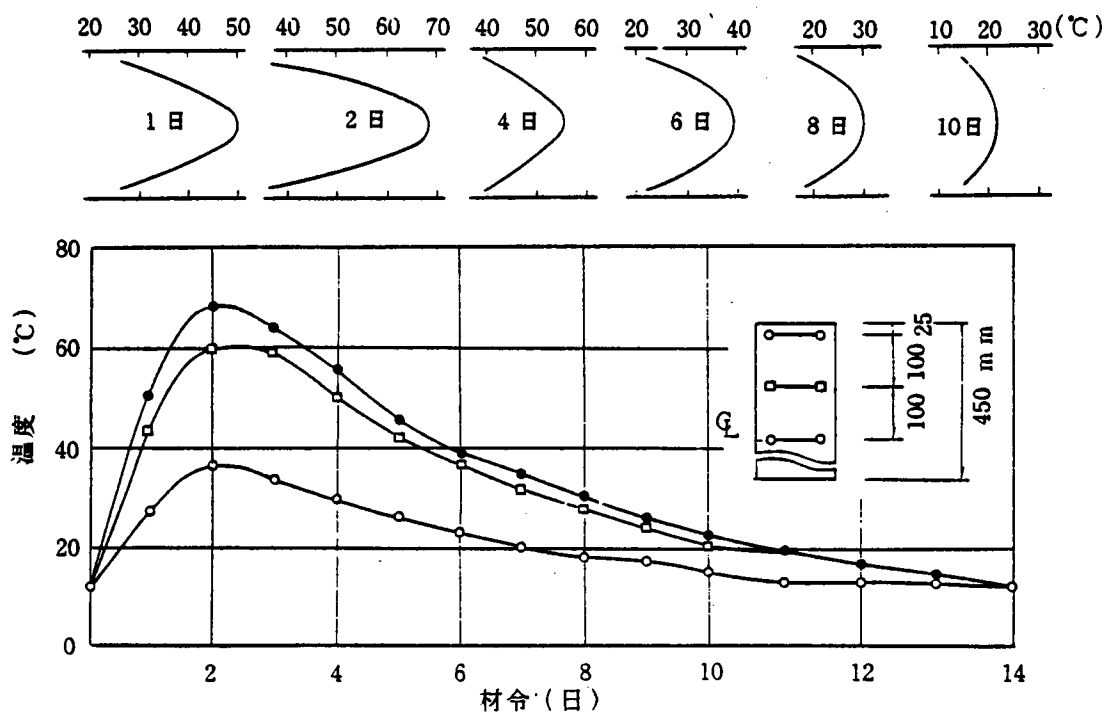


図-6.17 加えた温度履歴および温度分布

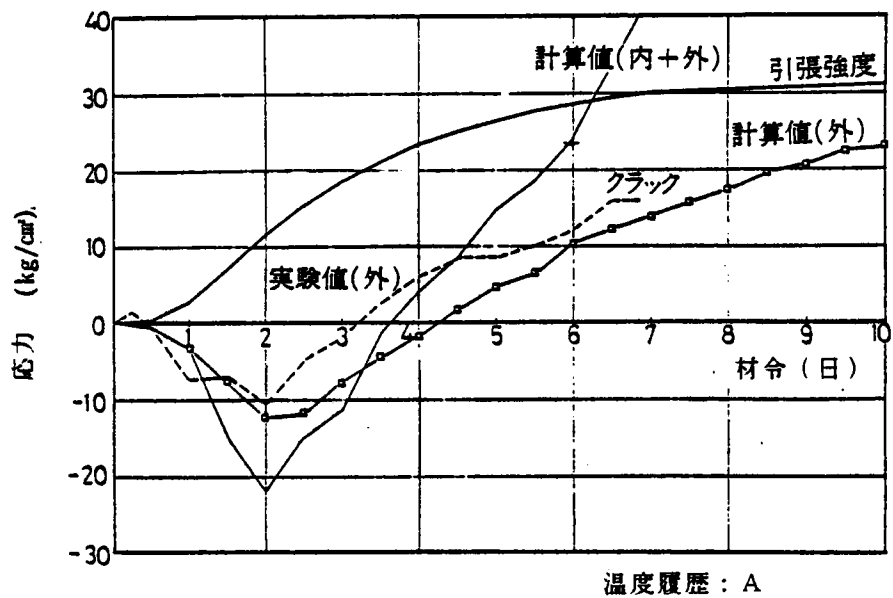


図-6.18 拘束応力測定結果および計算結果 ($R = 0.45$)

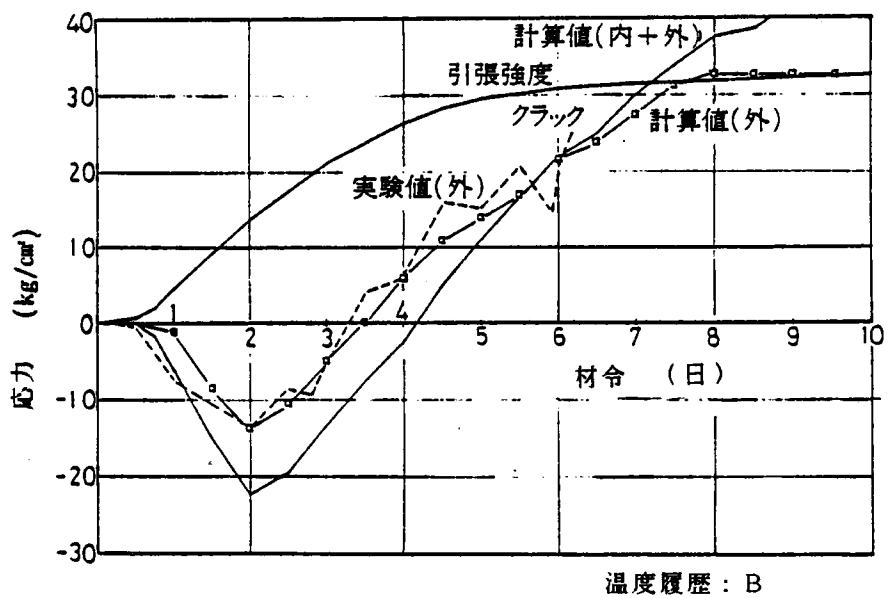


図-6.19 拘束応力測定結果および計算結果 ($R = 0.69$)

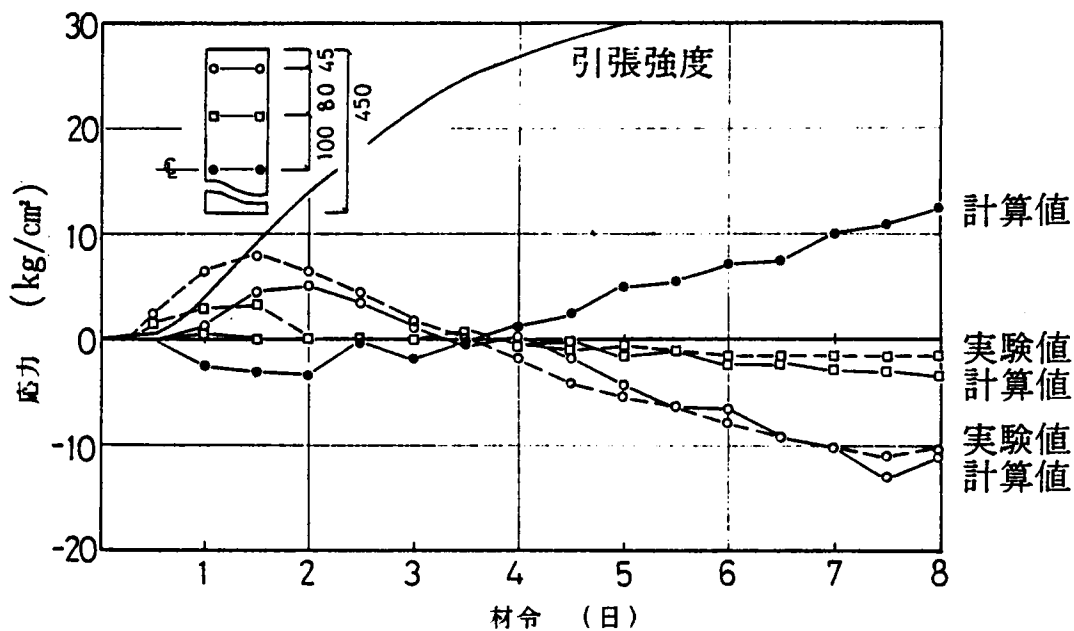


図-6. 20 有効応力計による内部拘束応力の測定値および計算値
(温度履歴 A)

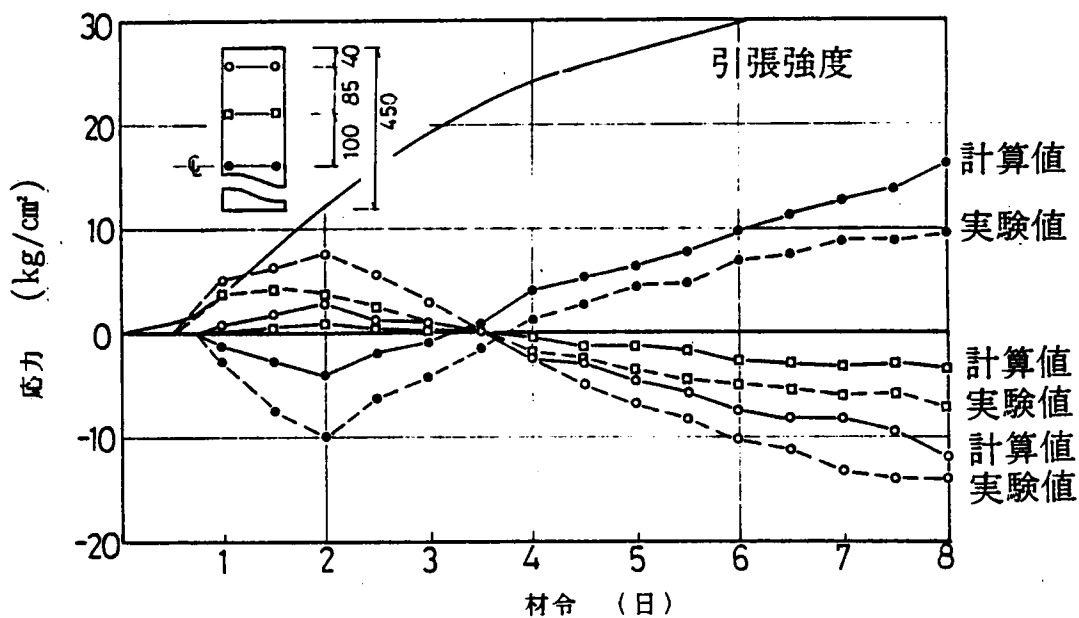


図-6. 21 有効応力計による内部拘束応力の測定値および計算値
(温度履歴 B)

表-6.1 コンクリートの配合

セメントの 種 類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランパ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤 (cc)
普 通	25	12	4.0	50.0	36.7	159	318	679	1169	96
中 高 熱	25	12	4.0	50.0	36.7	159	318	679	1169	96

表-6.2 拘束応力の最大値

(kg/cm²)

(左：初期圧縮応力、右：引張応力)

セ メ ン ト	練上り 温度 (°C)	拘 束 度					
		0.16		0.38		0.71	
N	18.5	5	11	6	18	—	—
	30.0	3	16	5	29	7	26
M	14.5	2	10	3	18	—	—
	30.0	2	14	3	25	5	20

$$* R = 1 / (1 + A_c E_c / A_s E_s)$$

E_c: 28日のヤング係数

** 材令, 2.5 日

*** 材令 2.8 日

表-6.3 ひびわれ発生時応力と強度の関係

	ひびわれ時 作用応力	硬化促進無視		硬化促進を考慮	
		引張強度	曲げ強度	引張強度	曲げ強度
NP-30	26	15	21	24	38
MP-30	21	13	20	22	36

(kg/cm²)

表-6.4 ひびわれ発生時の材令と拘束応力実測値

温度履歴	拘束度	ひびわれ発生材令(日)		ひびわれ発生時応力 (kg/cm ²)	
		実験	計算	内部拘束応力	外部拘束応力
A	0	発生せず	発生せず	—	—
	0.45	6.8	6.3	14.0	16.0
	0.69	5.6	5.8	9.5	17.5
B	0	発生せず	発生せず	—	—
	0.45	8.0	8.8	17.5	14.5
	0.69	6.1	7.2	8.0	23.5

第7章 クリープによる応力緩和およびひびわれ発生の確率論による評価に関する研究

7. 1 研究目的

第5章に提案した方法は、材料特性や拘束状態を実際の現象とできるだけ異ならないよう忠実に表現したものである。従ってクリープによる応力緩和現象も含めた解析が可能である。第2章において述べたように、マスコンクリートのクリープによる応力緩和の評価に関する研究は極めて少なく、一般には有効ヤング係数法で精度上の懸念なしで最も簡易な形で表現し、クリープ係数の定量的な与え方についても系統的な検討は行なわれていない。

本章においては、最初にこのクリープによる応力緩和の問題を取り上げた。すなわち、7. 2節においては、まず5章の方法によるシミュレーション解析を行い、マスコンクリートにおける各種要因の応力に与える影響を評価すると共に、弾性解と粘弾性解（クリープ解）の比較により、応力緩和度の程度やこれに影響を与える要因について検討を加えることを目的とした。

また有効ヤング係数法や平均応力法等のクリープ関数を用いる方法に代って、レラクセーション関数を用い応力解析を行うことが考えられる。7. 3節には、マスコンクリートであることの特性を考慮したレラクセーション関数を求めることを試みた。

一方、ひびわれ発生の評価は、発生応力が引張強度を越えた場合に発生し、これを下回る場合には生じないとする決定論的评价が一般に行われている。しかし、このような評価では、実際の現象と異なり、誤った判断となることはしばしば遭遇することがある。

また限界状態設計法の導入が開始され始めた現在では、不十分な評価と言わざるを得ない。7. 4節においては、このようなことから確率論を導入したひびわれ発生評価について基本的な展開を行い、ひびわれ予防設計法を提案することを目的とした。

7. 2 クリープによる応力緩和に関する研究

7. 2. 1 概要

5章で述べた解析システムを用いて、ひびわれ発生に関連するセメント量、部材厚、打設温度等の各種要因を変化させたシミュレーション解析を行い、これに基づいて考察を加えることとした。まずこの結果から、要因の効果を把握するとともに、弾性解との比較によりクリープによる応力緩和効果の程度を把握することとした。

7. 2. 2 解析モデルおよび解析条件

対象としたモデルは図-7. 1に示すように、一次元の熱の移動のあるベースマットを対象とした。温度解析は差分法によって行い、熱的特性は表-7. 1に示す通り設定し、⁽¹⁾境界条件としては岩盤とコンクリートとの境界下2 mに打設コンクリート温度と等しい定温境界があるものとした。また外気温は打設温度よりも3℃低いものとした。

シミュレーションの要因として表-7. 2に示すように、セメントの種別、セメント量、部材厚、打設温度および拘束度を変化させた。

第5章に示した方法を用いた応力解析に関連する要因として、材令28におけるコンクリートの強度はどのコンクリートに於ても 210 kg/cm^2 一定とした。また強度発現に関する係数として、表-7. 3に示すように、洪の提案⁽²⁾に従って積算温度と強度の関係に対する係数のうち、水セメント比55%のA~Dの係数を各種のセメントに対して用いた。ヤング係数および引張強度としては次のような圧縮強度の関係式で与えた。ヤング係数は一般の割線ヤング係数に比べると大きい、クリープ関数にCEB-FIP式を用いたことから、これに準じた初期接線ヤング係数を用いたものである。

$$E_c = 2.1 \times 10^4 \cdot \sqrt{f_{c'}} \quad (\text{CEB-FIP})$$

$$\sigma_t = 1.56 \times \sqrt{f_{c'}} \quad (\text{ACI})$$

クリープはCEB-FIP式によるものとし、流動に関するクリープ係数を1.3、フローの進行に関する係数は部材厚80 cmに相当のものを用いた。温度に関しては $\alpha = 0.4 + 0.03 T$ なる関数⁽³⁾をクリープ係数に乗じた。

7. 2. 3 解析結果とこれに対する考察

(1) 各種要因の効果

セメント種別の効果の一例として、拘束度0.6、セメント量 300 kg/m 、部材厚 160 cm の材令40日における応力分布を図-7.2に示す。予測されるように低発熱性セメントでの最大応力は比較的小さく、中庸熱セメントを用いたときの応力は早強セメントを用いた場合の約60%となっている。

図-7.3は、単位セメント量と、外気温と平衡に達したときの引張強度と発生応力との比、すなわちひびわれ安全度との関係を示したものである。セメント量低減はひびわれ防止に有効であり、セメント量増加に比例してひびわれ発生の危険度が増すことが認められた。本解析ではセメント量 30 kg/m 減少に対し安全度が約15%増す結果となった。

部材厚については図-7.4に示すように、同じ拘束度に対して、部材厚が小さいほど、安全度が増すことが認められる。しかし部材厚が 2 m を超えると、さほど影響は認められていない。ダム施工に示様されているリフト厚 1.5 m を標準とし、拘束の大きい場合等で 0.75 m とする方法は極めて妥当な方法であることが本解析からもいえる。

図-7.5は打設温度とひびわれ安全度の関係を示している。この結果ではひびわれ安全度は夏期の方が小さく、強度発現が冬期に比べて早いとしても、発生応力がこれを上回っている。冬期の方が強度発現も小さく、温度差が大きいことから危険であるとする議論があるが、本解析結果では夏期施工の方がひびわれが発生しやすいといえそうである。本解析では外気温一定としているが、通年で考えると夏期コンクリートの熱収縮が大きいことから、夏期施工に最大の留意を払うべきと考えられる。

以上のように、通常考えられている種々の対策の効果が提案した解析方法で定量的に評価でき、その根拠が裏付けられることが本シミュレーション解析結果からも明らかとなった。

(2) クリープによる応力緩和についての考察

上記の各種要因を変化させたシミュレーション解析のうち72例について、クリープを考えないクリープ解と弾性解の比（以下緩和率と称する）が材令によってどう変化するかを求めた。

図-7.6は解析の一例を示したものである。材令と共に緩和率は小さくなり、この曲線は次の分数式とよい近似を示した。

$$\eta = \frac{1}{1 + A t + \frac{1}{1 - P}} + P \quad \text{----- (7.1)}$$

すなわちPが最終緩和率で、Aが緩和速度に関する係数を示すこととなる。この例では $P=0.70$ であるが、初期の緩和率の低下が大きいことを示している。すなわち有効ヤング係数を用いた簡易式においては、初期のヤング係数の低減を大きくすべきことを示唆している。さて、PおよびAは、材料特性や温度履歴によって変化するものと考えられる。回帰分析の結果では、各要因について有意な関係は見出せなかったが、この中では部材の中心部最高温度（ T_{max} ）と比較的よい相関を示した。図-7.7はこれらの関係を示したもので、かなりばらつきがあるがPは0.6~0.7の範囲にあり、温度と共にやや小さくなる傾向が、Aは最高温度が高いほど大きい関係がみられる。回帰式を適用したときには、PおよびAは各々、次式で近似できる。

$$P = 0.7 - 0.006 T_{max} \quad \text{----- (7.2)}$$

$$A = 0.05 T_{max} - 0.29 \quad \text{----- (7.3)}$$

このように応力緩和率および速度が、最高温度に影響されることは、高温ほどクリープが大きいこと、およびマッショナ部材ほど高温となり温度降下速度も緩やかで、応力緩和の度合いも大きいことから想定される。

中内ら、⁽⁴⁾ および崎本ら⁽⁵⁾ は、各々マスコンクリート構造物に埋設した有効応力計、およびひずみ計から求まる応力測定値あるいはクリープによる応力緩和を含むヤング係数に対する考察を行い、応力緩和率の最終値は各々0.55、0.44であった事を報告している。

本解析では前述のように0.6~0.7となっており、緩和される程度をやや小さく評価していることになる。この原因の一つとしては、本解析においては、基本流動係数を1.3と日本でのスランプの実態から考えるとやや低めに設定していることが考えられ、この点を配慮すれば、実測報告例とかなり近いものが得られるものと思われる。

なお、式(7.1)および(7.2.3)を用いれば、弾性解からクリープ解を得ることは容易であり、ベースマット状マスコンクリート部材の防止対策の適当な目安をたてるための応力の試算を行う場合には有用であると思われる。

7.3 マスコンクリートにおけるリラクセーション関数に関する検討

7.3.1 概要

第2章に述べたように、一般に外部拘束応力 T を求める最も簡易な算定式は次式で表わされている。

$$\sigma = R \alpha E \theta \Delta T = R \alpha \frac{E}{1 + \varphi} \Delta T \quad \text{----- (7.4)}$$

本式は時間的に変化する R 、 φ 、 E および ΔT を正しく評価できず、概念を示す式とは用いえても、算定式としては問題があり、少なくとも増分和とした次式を用いるべきであることは先に述べた通りである。

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^j \Delta \sigma_{i,j} = \sum_{i=1}^j \alpha R_i \frac{E_i}{1 + \varphi_{i,j}} \Delta T_i \quad \text{--- (7.5)}$$

上式は、いわゆる有効ヤング係数法によるものでクリープによる応力緩和を最も簡易に評価できるものであるが精度については、疑問があり、Chiorio ら⁽⁶⁾のCEB-Design manualにおいても第一次近似としての評価しか与えておらず、詳細には材令調整有効ヤング係数を用いるべきことを述べている。しかしながら、この方法に用いる材令係数 $\chi(t, t_0)$ を求めるために数値計算が必要となる。

従って、もし、マスコンクリートの特性を加味したリラクセーション関数 (η) が得られるならば

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^j \alpha R_i E_i \eta_{ij} \Delta T_i \quad \text{----- (7.6)}$$

として求まり、机上計算でも容易に応力が求まることとなる。

7.3.2 マスコンクリートにおけるクリープ関数

CEB-FIP式による場合、フローに関する係数 $\varphi = \varphi_{f1} \cdot \varphi_{f2}$ において、 φ_{f1} はマスコンクリートにおいては、内部まで乾燥されるのに長期を要するので、非常に湿った雰囲気中の値である1.0、をまた係数 φ_{f2} は部材厚が80cm以上であることから1.1~1.3の範囲にあるとみなすことができる。

すなわち、 φ として硬ねりコンクリートに対し、約1.2程度、スランブ8cm以上では25%増として1.5程度と考えてよい。またフローの進行に関する係数 $\beta_f(t)$ についても仮想厚80cm~1.6mの値を用いることができる。

以上のように、マスコンクリートにおいては、クリープに関する特性値をかなり限定した範囲と考えることができ、この範囲でリラクセーション関数を求めれば、7.6式を用いてクリープを考慮した応力解を容易に求めることができる。

このことを式で表示すれば次のように表わすことができる。

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_{c28}} (t, t_0) \quad \text{----- (7.7)}$$

$$(t, t_0) = \beta a(t_0) + \varphi_d \beta_d(t - t_0) + \varphi_f [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \quad \text{----- (7.8)}$$

において、急速初期変形 βa および遅延弾性 $\varphi_d \beta_d$ はCEB-FIPで定義されているものを関数表示すればよい。流動に関する項は φ_f として、通常1.2～1.5を探り、温度に応じて増加させればよい。 β_f は部材厚80cmとして、次の関数で表示することとする。部材厚が大きい場合には同様の方法で関数を定めてもよいが、基準で与えられた図から想定すると大きな影響はないものと思われる。

$$\left. \begin{aligned} \beta_f(t) &= 0.314 \log t & (1 \leq t \leq 3) \\ &= 0.243 \log t + 0.034 & (3 \leq t \leq 100) \\ &= 0.360 \log t - 0.24 & (100 < t < 1000) \\ &= 0.370 \log t - 0.23 & (1000 \leq t \leq 10000) \end{aligned} \right\} \text{----- (7.9)}$$

なお t としては硬化促進の影響を加味して、有効材令 t_e とすればよい。

7. 3. 3 解析方法

先術のように、マスコンクリートにおいてはクリープ関数が汎用的に定まることから、リラクセーション関数を求めておけば、マスコンクリートに一般に適用しうるものが得られる。

リラクセーション関数 $\eta(t-\tau, t)$ は積分方程式

$$\int_{\tau}^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + \frac{\varphi(t-\tau, \tau)}{E_0} \right] d\tau + \alpha \Delta T_{t-\tau} = 0 \quad \text{----- (7. 10)}$$

の解として、次のように得られる。

ここでは、材令 τ において、温度変化 ΔT が生じ以後一定温となるときにの応力変化を、第5章で用いた数値解析法で求め、初期応力 σ_0 で除すことによりリラクセーション関数 η を得ることとした。温度変化の載荷材令は1, 3, 5, 7, 14日とし、載荷後28日までの η を求めた。流動に関する係数としては、1.0 および 2.0 の場合について求めた。

7. 3. 4 解析結果および考察

解析結果を $\varphi_f = 1.0$ に対し表-7. 4 および図-7. 8 に、 $\varphi_f = 2.0$ に対して表-7. 5 および図-7. 9 に示す。

いずれの場合も、載荷後材令と共に減少すること、載荷時材令が若いほど応力緩和されること、材令28日においてもなお減少する傾向のあることがわかる。また $\varphi_f = 1.0$ の場合で材令28日で0.7~0.75、 $\varphi_f = 2.0$ の場合で0.55~0.7の範囲である。各々の曲線は近似式で与えることができる。例えば、小沢がダムコンクリートに対して用いた次式を適用すると、

$$\eta = A + (1-A) e^{-B\sqrt{t-\tau}} \quad \text{----- (7. 11)}$$

$\varphi_f = 1.0$, $\tau = 3$ 日で $A = 0.65$, $B = 0.27$, $\varphi_f = 2.0$, $\tau = 3$ 日で $A = 0.55$, $B = 0.34$ でよい近似が得られる。同様の方法で、 φ_f と τ の組合せに対して A , B を求めれば、式(7. 6)を用いて任意の材令における応力を求めることができる。この場合、 $\varphi_f = 1.0$ の場合に特に顕著にみられるように、載荷時材令の τ に与える影響は比較的小さいので、簡易に求める場合は、部材の温度履歴において降下速度の大きい材令を τ とするものを用いることもできると思われる。

なお、本解析での急速初期変形や遅延弾性を含むクリープ係数は、 $\varphi_t = 1.0$ 。 $t = 3$ 日の場合、載荷後28日で1.11であり、式(7.4)で求めると $\eta = 0.47$ となり、かなり応力緩和を過大に評価することがわかる。

従って、マスコンクリート部材のように、短期から応力が作用する場合に、有効ヤング係数法で応力を求めることには問題があるといえる。

7. 4 ひびわれ発生の確率的評価

7. 4. 1 概要

ひびわれは発生する応力と強度の相対関係で決定されるが、前者は材料の発熱特性、熱的性質、力学的特性、気象条件等が関係し、計算値に誤差が含まれることは避け得ない。また、強度は統計的にある分布を示すことが多くの事例で実証されている。従って、いずれもあるばらつきを有する確率的事象である。従来、マスコンクリートのひびわれ発生は、応力がある限界状態に達したときに発生し、それ以下では発生しないとする。いわゆる決定論的に取扱われてきたが、確率的に論じられなければならない。⁽⁹⁾

発生応力 S に対し、強度 R を考え、 R および S が正規分布し、 $R = N(\mu_r, \sigma_r)$ 、 $S = N(\mu_s, \sigma_s)$ で与えられるとすると、 $Z = R - S$ も正規ガウス分布をし、

$$Z = N(\mu_r - \mu_s, \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}) = N(\mu_z, \sigma_z) \text{ で与えられる。}$$

従ってひびわれ発生確率 P_f は

$$\begin{aligned} P_f &= P(Z < 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2} dz \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}}\right) \end{aligned} \quad \text{----- (7. 12)}$$

ここに Φ : 平均 0、標準偏差 1 の正規確率分布関数

今、ひびわれ安全度 ν_0 を μ_r と μ_s との比と考えると、(7. 12) 式は

$$P_f = 1 - \Phi\left(\frac{\nu_0 - 1}{\sqrt{\nu_0 \frac{\sigma_r^2}{\mu_r^2} + \frac{\sigma_s^2}{\mu_s^2}}}\right) \quad \text{----- (7. 13)}$$

となる。従って ν_0 とひびわれ発生確率は、図-7. 10 に示すような関係となる。

本節では、マスコンクリートのひびわれ発生確率と ν_0 の間に、上記のような基本的な取扱いが可能であるか、また、どのような関係が認められるかを検討することとする。

なお、本来ならば強度はマスコンクリートにおいては持続载荷下における値と

すべきと思われるが、十分なデータがないため、ここでは通常試験で得られる値を基準に考えるものとする。

7. 4. 2 検討方法

確率的な評価を行うには、多くのデータを蓄積する必要がある。ここでは、著者らが行った解析と実測では不十分であるため、既述の文献の結果を引用し、併せて検討することとした。

しかしながら、文献からでは、温度解析および詳細な応力解析を行うためには、不明の点も多いため、ここでは次のような簡易な方法で、ひびわれ安全度を推定することとした。

すなわち、7. 2 節において、各種要因を変化させたシミュレーション解析を行い、各々についてひびわれ安全度を求めた。この結果を利用すれば、各種要因とひびわれ安全率の関係を重回帰分析により求めることができる。回帰式としては7. 2、(3)で得られた結果を参考に次のように定めた。

$$\text{ひびわれ安全度 } f_{\text{crit}} = k (a_0 + a_1 x_1 + a_2 \log x_2 + a_3 x_3) \quad \text{----- (7. 14)}$$

ここに x_1 : 単位セメント量 (kg/m^3) x_2 : 部材厚 (cm)

x_3 : 打設時のコンクリート温度 k : セメントの種類による係数 (普通 = 1.0, 早強 = 0.7, 中熟練, マスコン用高炉, フライアッシュ = 1.2)

シミュレーション解析での拘束度毎に求めた係数 $a_0 \sim a_3$ は表-7. 6に示す。重相関係数は0.92となり、良い相関を示した。本式はベースマット状構造物を対象にした解析から得られたものであるが、解析の基本は壁状構造物でも変わらないことから、壁状構造物に適用しても大きな誤差は生じないものと考えられる。

7. 4. 3 検討結果および考察

表-7. 7は、著者らが関連したマスコンクリート構造物における、構造物概要、材料、配合、温度測定結果、ひびわれの有無および5章の方法で求めた外気温と平衡に達したときのひびわれ安全度 f_{cr} の計算結果を示す。

表-7. 8は森永が既往の研究を総括したものを示す。⁽⁷⁾ また表-7. 9は泉が高速道路のボックスラーメン隧道で測定した結果の数例を引用したものである。⁽⁸⁾ これらにおいては拘束度は、これに関する断面や打継ぎ材令、ヤング係数が不明なものが多いため、形状から0.2ごとに5ランクに分け、式(7.14)の

重回帰分析結果を参考にひびわれ安全率を推定した。

これらのデータをひびわれ発生の有無に分け、 ν_0 と各々の累積百分率の関係を正規確率紙にプロットしたものを図-7.11に示す。図より明らかなように、各々の場合 ν_0 は正規分布を示すと考えてよいことがわかる。今ある ν_0 に対し、ひびわれが生じた場合および生じなかった場合の累積百分率を各々 F_a 、 F_b とし、 $F_a / (F_a + F_b)$ をひびわれ発生確率として考えると、図-7.12に示す関係が得られる。

図はほぼ(7.13)式に示す P_f と対応していることがわかる。

安全率が1以上でも、ひびわれの危険度はかなり残されていること、 ν_0 が1.0の場合 $P_f = 0.40$ を示し、ひびわれをほぼ完全に避けるためには、安全度を1.3以上と、かなり高くしなければならないことなどがわかる。

このような確率論に基づく展開が可能となれば、従来、安全率1を境界として論じられていたものが、設計上定量的に取扱う事が可能となる。すなわち構造物の置かれる環境、水密性、気密性等の機能等に関連してひびわれ安全度の設計許容値を定めることが可能である。

しかしながら、表-7.7~9において、ひびわれをほぼ避けられる安全度1.5以上となったものは、抗拘束等、外的拘束の極めて緩やかな場合を除くと、低発熱セメントを用い、かつセメント量を低減した例に限られ、完全にひびわれを避けるためには、かなりの温度低減の努力を払わなければならない事を示している。

米国、イギリスではこのような観点から、ひびわれは避け得ないものとして、鉄筋、目地等によるひびわれ幅の制御を基準化しており、また、Leonhardt は、マスコンクリートのひびわれ制御のための最小鉄筋比を提案している。このような観点での検討は、今後の大きな課題であり、本論文でも触れていない。著者は、鉄筋による制御は経済性に問題のあること、目地を含む構造系の解析が必ずしも十分でないことを考えると、材料、配合施工において、ひびわれを避ける努力が前提とした上、論じられるべき大きな今後の課題であると考えている。

先述のように、ひびわれ安全率は、重回帰式による推定を行ったことや、拘束度についてかなり大略な評価を行っているため、さらに精度の高い安全率とひびわれ発生確率の関係を導くためには、今後データの蓄積が必要である。しかし、本節で示した手法によれば、確率論による評価が基本的に可能であり、材料強度と荷重に対して行われる構造物の破壊確率の考え方は、マスコンクリートのひびわれ問題にも適用できるものと思われる。

7. 5 結語

- (1) ひびわれ発生に与える各種要因の影響についてシミュレーション解析を行った結果、a)セメント種別では中熱セメントが最も優れており、普通セメントを用いた場合の1.3～1.5倍のひびわれ安全率を有すること、b)単位セメント量30kg/㎡の低減に対して、安全度が15～20%増加すること、c)リフト高さは1.5m以内で防止効果が大いこと等、提案した解法により定量的なひびわれ発生評価が可能であることがわかった。
- (2) 増分法で弾性的に求めた場合と、クリープの影響を考慮して解いた場合を比較することにより、クリープによる応力緩和が大きく、応力評価上、クリープの影響を無視できないことが明らかとなった。
- (3) 流動に関するクリープ係数を1.3とした場合で、応力緩和度（弾性解比）で0.6～0.7であり、半減近くまで応力は低減される。
- (4) 低減率やその速度は、温度履歴における最高温度が高いほど大きくなることわかり、この関係を近似的に示した。
- (5) マスコンクリートにおいては、クリープ特性として一般化したものを用いることが分り、CEB-FIP式からその式を示した。
- (6) 上述の式を用い積分方程式を数値解析することにより、リラクセーション関数を求めた。応力緩和度は初期材令ほど大きく、クリープが大きいときには載荷後材令28日では、0.6を下回る場合もみられた。
- (7) リラクセーション関数を用いることにより、5章で述べた方法よりもさらに簡易にマスコンクリートの応力を推定できることを示した。
- (8) リラクセーション関数として小沢が与えた次式はよい適合性を示した。

$$r = A + (1 - A) e^{-B \sqrt{t - \tau}}$$

また、マスコンクリートに有効ヤング係数法を適用することには、本質的に問題があるといえる。

- (9) マスコンクリートのひびわれ評価については、決定論によるのではなく、確率論によるべきとの考えから、ひびわれ発生確率の考え方を導入しうることを示した。
- (10) 資料から、ひびわれ安全度とひびわれ発生確率の関係を統計解析により求めた結果、安全度が1.0で発生確率は約50%、ひびわれを安全に避けるためには、安全度を1.5以上にすべきこと等を明らかにした。

【参考文献】

- (1) 平賀, 倉林: コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究
成果について, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関する
コロキウム論文集, pp.1~6, 日本コンクリート工学協会, 1982.9
- (2) 洪, 長島: 寒中コンクリート, 技術書院, 1968
- (3) 岡田他: 高温下におけるコンクリートのクリープ、竹中技術研究報告,
第17号, pp.59-66, 1977.4
- (4) 中内他: マスコンクリートの温度応力解析, 間組研究所年報,
pp. 159 ~ 179, 1980
- (5) 崎本他: 水和熱によって発生する鉄筋コンクリート壁体の温度応力につ
いて, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム
論文集, pp. 105 ~ 112, 日本コンクリート工学協会, 1982.8
- (6) M.A.Chiorino et al.: CEB Design Manual on Structural Effects of
Time- Dependent Behaviour of Concrete, Georgi Publishing Comp.
1984
- (7) 森永他: マスコンクリートの水和熱によるきれつ防止を目的とした施工
法, コンクリート構造物のひびわれに関するしんぽじうむ発表報文論文集、
日本コンクリート工学協会, 昭和52.3
- (8) 泉: マッシブな鉄筋コンクリート構造におけるコンクリートのひびわれ
対策、コンクリートのひびわれ、pp.417-501, 経営開発センター出版部、
昭52.8
- (9) 星谷: 確率手法による構造解析、鹿島出版会、昭. 48

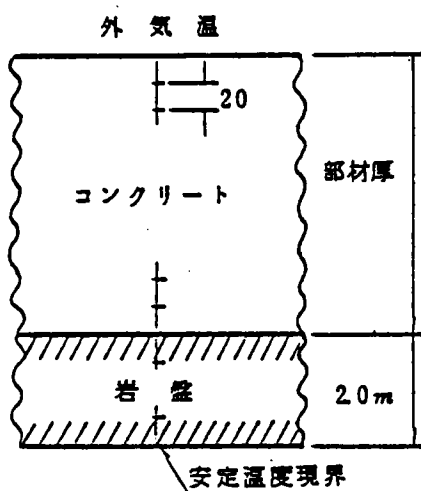


図-7.1 シミュレーションモデル

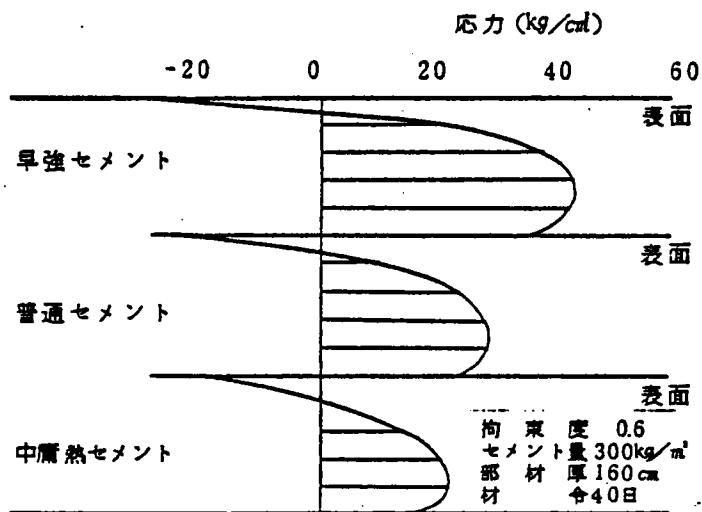


図-7.2 セメント別応力分布

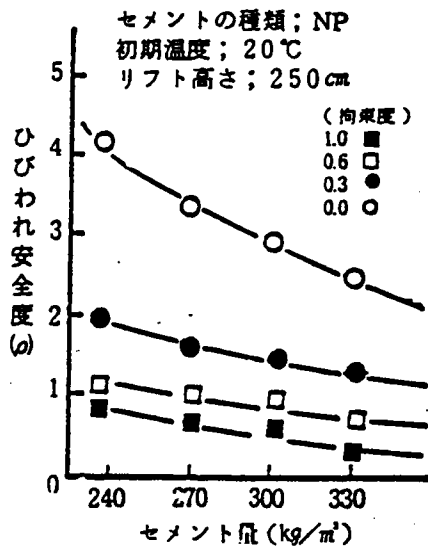


図-7.3 セメントの影響

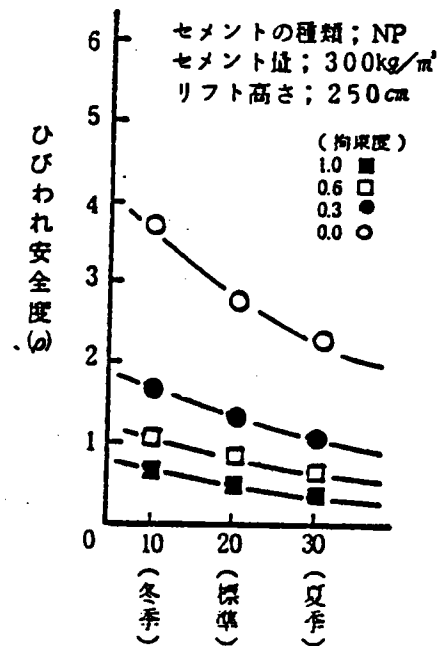


図-7.5 施工時期の影響

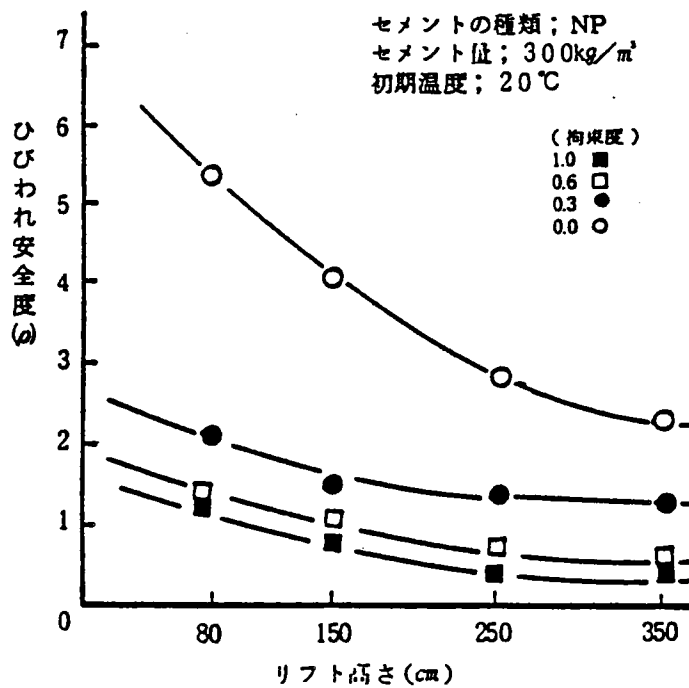


図-7.4 部材厚 (リフト高) の影響

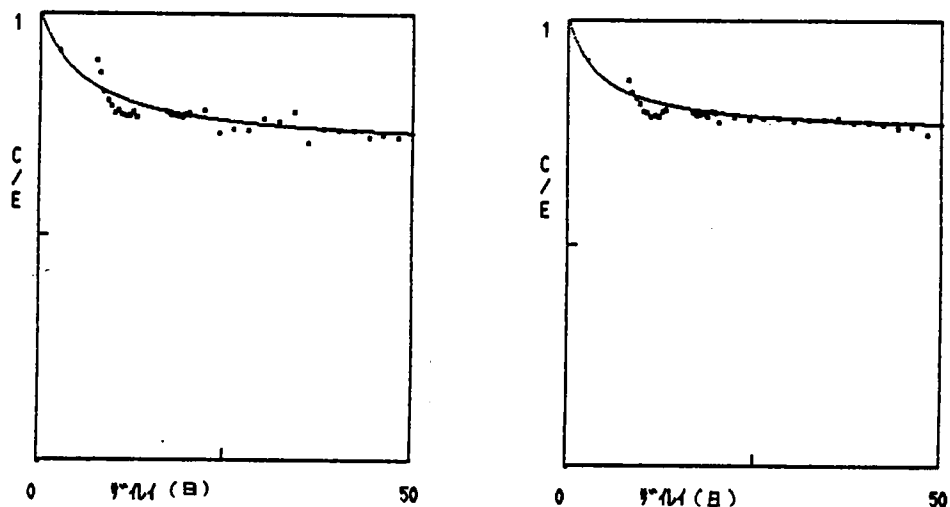


図-7.6 応力緩和度の計算の一例

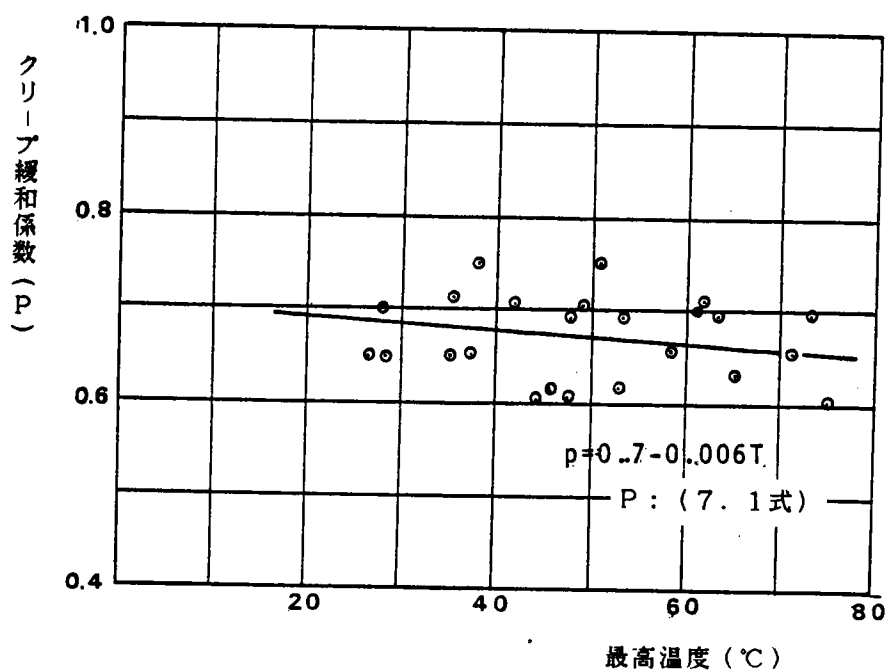


図-7.7 応力緩和に関する係数と最高温度の関係 (a)

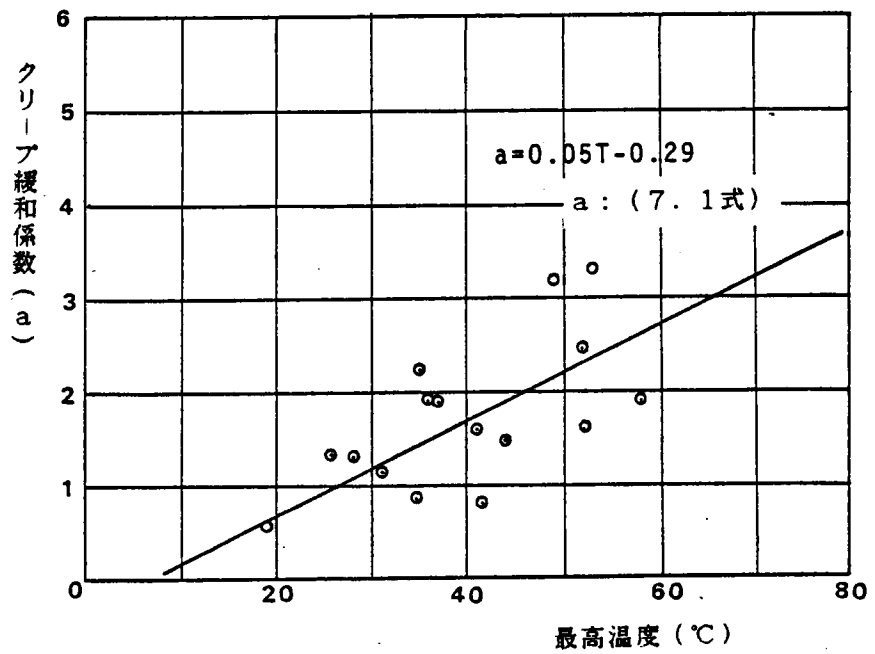


図-7.7 応力緩和に関する係数と最高温度との関係 (b)

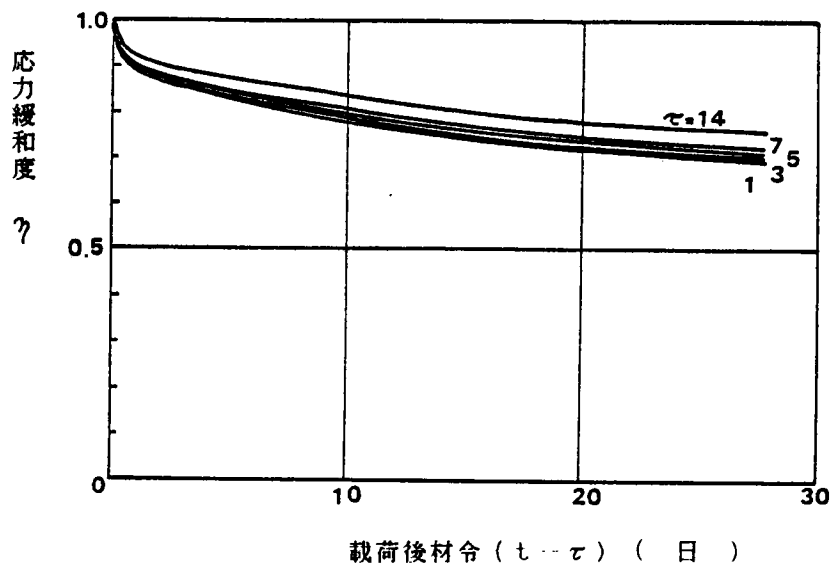


図-7.8 応力緩和曲線 ($\phi_f = 1.0$)

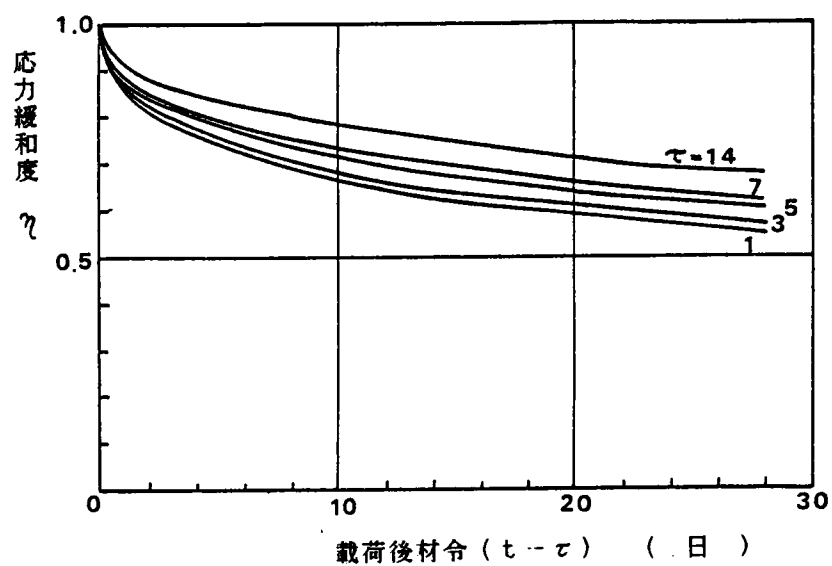


図-7.9 応力緩和曲線 ($\phi_f = 2.0$)

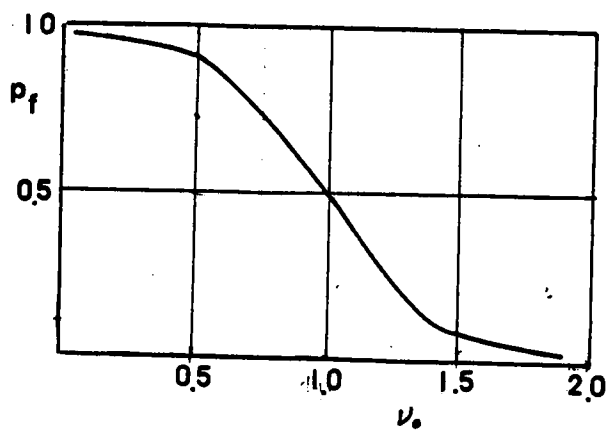


図-7.10 ν_0 と P_f の関係

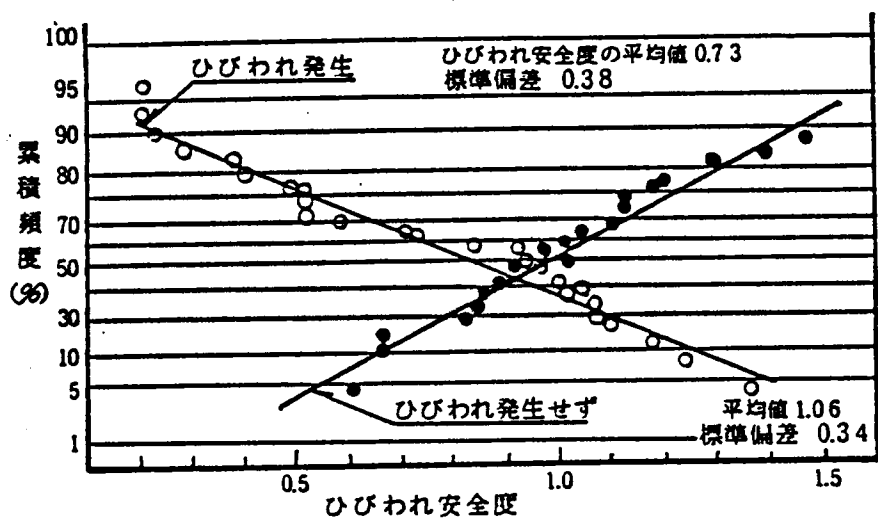


図-7. 1 1 ひびわれ発生の累積頻度

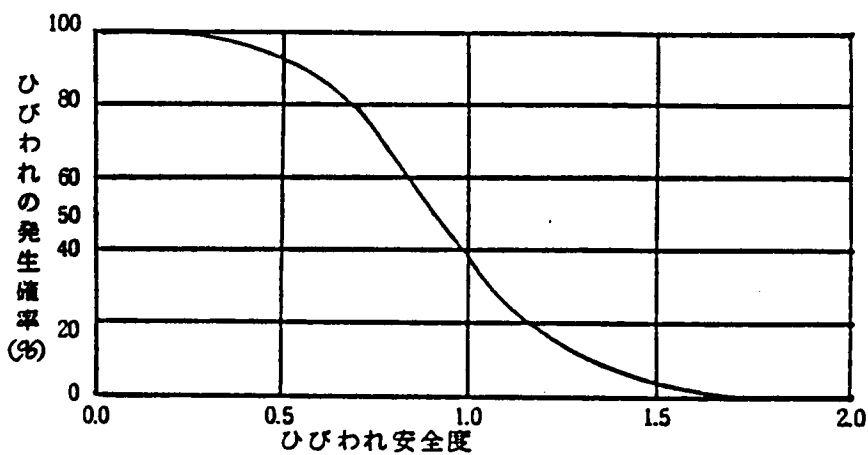


図-7. 1 2 ひびわれ発生確率と安全率の関係

表-7. 1 熱解析に用いた定数

項 目	係 数
コンクリートの熱伝導率	31.2kcal/m·day·℃
コンクリートの熱拡散率	0.08 m ² /day
岩盤の熱伝導率	31.2kcal/m·day·℃
空気の熱伝導率	600kcal/m ² ·day·℃
コンクリートの断熱 温度上昇式の係数 $O=K(1-e^{-At})$ ○ 打設温度10℃の 場合は $K \times 1.1$ $A \times 0.5$ ○ 打設温度30℃の 場合は $K \times 0.95$ $A \times 1.5$	セメント単位セメン 種 類 土量(kg/m ³) K A
	普通ポ トラント 250 36.75 0.75
	トラント 300 42.50 0.96
	350 48.25 1.17
	高炉B種 250 31.25 0.78
	300 36.50 0.97
	350 41.75 1.17
	早強 セメント 300 41.00 6.03
	中熱 セメント 300 33.00 0.65
	フライア ッシュB種 300 41.00 0.73

表-7. 2 シミュレーションの因子と水準

因 子	水 準
セメント種別	普通ポルトランド(NP), 高炉B種(KB) 早強ポルトランド(HP), フライアッシュB種(FB) 中熱ポルトランド(M)
単位セメント(kg/m ³)	240, 270, 300, 330
リフト高さ (cm)	80, 150, 250, 350
打設温度 (℃)	10(冬季相当), 20(標準季相当), 30(夏季相当)
拘束度	1.0 0.6 0.3 0

表-7.3 強度發現特性

セメント種別	$M \leq 210 \cdot D \cdot D$		$M \geq 210 \cdot D \cdot D$	
	A	B	C	D
普通ポルトランドセメント	2079	0.00699	0.850	0.0202
高炉B種、フライアッシュ B種、中腐熟	2079	0.00792	1.180	0.0169
早強ポルトランドセメント	1.845	0.00651	0.435	0.0246

A, B, C, Dは、強度発現に関する実験定数

表-7.4 $\phi_f=1.0$ のときのクリープによる応力緩和度

<div style="text-align: center;"> 載荷後 材令 (日) 載荷時 材令 τ (日) </div>	1	3	5	7	14	28
1	0.889	0.852	0.825	0.805	0.752	0.694
3	0.882	0.847	0.821	0.803	0.753	0.697
5	0.888	0.856	0.833	0.816	0.767	0.712
7	0.893	0.863	0.842	0.826	0.779	0.724
14	0.913	0.887	0.869	0.855	0.813	0.760

表-7. 5 $\phi_f = 2.0$ のときのクリープによる応力緩和度

載荷後 材令(日)						
載荷時 材令 τ (日)	1	3	5	7	14	28
1	0.849	0.785	0.741	0.709	0.631	0.552
3	0.860	0.801	0.759	0.728	0.636	0.574
5	0.872	0.819	0.781	0.752	0.677	0.599
7	0.880	0.831	0.796	0.769	0.697	0.619
14	0.904	0.866	0.837	0.814	0.750	0.674

表-7.6 重回帰係数 $a_0 \sim a_3$

拘束度	a_0	a_1	a_2	a_3
1. 0	4.56	-0.0047	-0.959	-0.0163
0. 6	4.88	-0.0052	-0.980	-0.0173
0. 3	6.64	-0.0189	-1.160	-0.0235

表-7.7 マスコンクリートの調査例

構造物 種類	施工・時期		材料・配合			温度				ひびわれ		拘束度	解析 安全率				
	最少 寸法 (m)	打設月 (月)	平均 気温 (℃)	セメント 種類	セメント 量 (kg/cu)	スランパ 量	打設 時 (℃)	最高 温度 (℃)	最高 材令 (日)	平衡 材令 (日)	平衡 温度 (℃)			有無	平均 幅 (mm)	平均 間隔 (mm)	
フーチング	2.0	7-8	25	N	292		12	25	725	1.5	10	50	○	0.2	3-4	0.45	0.63
ラーメン壁	2.0	9-10	22	N	292		12	29	62.0	1.5	6	40	○	0.2	2-4	0.80	0.58
箱型中壁	0.8	2	5-10	N	290		8	8-15	26.5	2	6	18	○	0.2	7.5	0.65	0.51
基礎版	1	7	26.5	MH	300		12	28	62.0	6	40	35	○	0.15	2.5	0.55	0.67
仕切壁	0.9	11	18	N	281		12	20	42	1	9	18	○	0.13	2.3	0.75	0.64
仕切壁	0.9	11	18	N	281		12	20	37	1	9	18	×			0.75	0.91
ベース1	1.5	5	24.4	MH	310		12	24	58	1.5	60	20	×			0.25	1.21
ベース2	1.0	6	26.2	MH	310		12	28.5	52	1.0	60	25	×			0.40	0.94
ベース3	1.5	7	22	MH	310		12	25	56	1.5	70	18	○	0.20	2.5	0.75	0.61
壁 1	1.2	11	15.3	MH	320		12	18	46	2	25	10	○	0.35	3.0	0.75	0.55
壁 2	0.9	5	23	MH	320		12	25	48.5	2	14	28	○	0.30	3.5	0.80	0.67
壁 3	0.7	5	23	MH	310		12	29	49.0	1	10	32	○	0.40	3.5	0.80	0.75
壁	1.3	7	26	MF	375		8	27	54	1.5	14	30	○	0.25	3.0	0.95	0.55

表-7.8 文献によるマスコンクリート構造物のひびわれ調査結果

表-2. 文献調査結果一覧表

文献 番号	構造 種類	② ③		④ ⑤		⑥ ⑦		⑧ ⑨		⑩ ⑪		⑫ ⑬		⑭ ⑮		ひびわれ 状況	安全度
		最小 断面	断面 形状	同断面 形状	月	セメント 配合	コンクリート 配合	スラン 配合	打設 時間	養生 時間	養生 温度	養生 湿度	養生 時間	養生 湿度	養生 時間		
1)-1	箱型ラーメン型	2.3	8	26.7	11	349	—	9	—	69	1.5	12	32	—	—	0	0.2
2)-1	箱型ラーメン型	2.3	8	11.7	11	302	—	9	—	56	2	12	31	—	—	X	0.8
3)-1	箱型ラーメン型	1.0	10	16.9	10	300	—	10	—	38	2	7	13	—	—	0	0.9
4)-1	ラーメン型	3.7	7	25.2	7	300	—	14	—	70	5	12	63	—	—	X	0.6
5)-1	ラーメン型	1.7	9	23.0	9	320	—	14	—	72	2	12	25	—	—	X	0.7
6)-1	箱型ラーメン型	1.55	12	6.6	12	187	—	10	—	32	3	12	20	—	—	X	2.1
7)-1	箱型ラーメン型	2.1	6	21.3	6	300	—	7.5	—	56	3	10	33	—	—	0	0.6
8)-1	箱型ラーメン型	1.0	—	20.0	—	305	—	7.5	—	48	2	14	20	—	—	X	1.3
2)-1	水門型	2.5	11	11.7	11	320	—	11	—	30	3	—	—	—	—	X	1.1
2)-2	水門型	1.0	9	23.0	9	320	—	14	—	65	1	—	—	—	—	X	0.9
3)-1	箱型ラーメン型	0.8	8	26.7	8	349	—	9	—	56	1	5	—	—	—	0	0.9
4)-1	箱型ラーメン型	0.42	11	11.7	11	330	—	3-5	—	45	1	4	—	—	—	X	2.3
5)-1	箱型ラーメン型	0.4	8	26.7	8	400	—	2	—	65	0.5	3	—	—	—	X	1.7
5)-2	箱型ラーメン型	3.5	1-2	4.5	1-2	349	—	9	—	14.5	3	50	16	—	—	X	0.5
6)-1	箱型ラーメン型	0.8	1-2	4.5	1-2	365	—	7-8	—	13.5	40	15	7	—	—	0	0.8
7)-1	箱型ラーメン型	1.0	8	26.7	8	320	—	4-6	—	30	51	2	14	—	—	X	1.0
8)-1	箱型ラーメン型	3.0	10	16.9	10	239	—	11-13	—	22	52	4	28	—	—	X	1.2
8)-2	箱型ラーメン型	3.0	8	26.7	8	293	—	8	—	31	71.9	3	25	—	—	X	0.6
10)-1	箱型ラーメン型	3.0	4	13.5	4	312	—	7.5	—	16	69	3	14	—	—	X	0.8
12)-1	箱型ラーメン型	0.5	11	11.7	11	220	—	5	—	14.5	19	1	20	—	—	X	4.3
28)-1	箱型ラーメン型	2.0	5	18.0	5	280	—	12	—	19	58.3	3	21	—	—	X	1.1
2)-2	箱型ラーメン型	2.5	5	18.0	5	297	—	12	—	24	52.5	3	11	—	—	X	0.8
3)-2	箱型ラーメン型	0.6	2	4.8	2	320	—	10	—	17.5	37.8	1	3	—	—	0	0.3
4)-2	箱型ラーメン型	1.2	2	4.8	2	320	—	10	—	17.5	49.8	0.5	5	—	—	0	0.2
5)-2	箱型ラーメン型	1.0	8	26.8	8	400	—	3-5	—	35.5	72.0	1	4	—	—	0	0.2
29)-1	箱型ラーメン型	1.6	5-6	19.7	5-6	300	—	7.5	—	—	56.0	2	10	—	—	0	0.6

表-7.9 ボックスラーメンにおけるひびわれ調査例

精 造 物		施 工 時 期		材 料 配 合		温 度 観 歴				ひ び わ れ			拘束度		解 析 安全率	
種 類	最少 寸法 (mm)	打設月 (月)	平均 気温 (℃)	セメント 種別	セメント 量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	打設 時 (℃)	最高 温度 (℃)	最高 材令 (日)	平均 材令 (日)	平均 温度 (℃)	有無	平均 幅 (mm)	平均 間隔 (mm)		
ボックスラーメン側壁	2.3	1	5	M	246	8	12	40.5	2.5			×				1.01
〃	2.3	9	22	F	326	8	28	59	2.5			○	0.37	2.5		0.35
〃	1.3	12	7	M	246	8	13	33.5	2.0			○	0.19	4.3		1.23
〃	1.5	8	26	F A	326	8	31	58	2			○	0.39	5.0		0.48
〃	0.8	11	12	M	246	8	16	30.5	1.5			×				1.39
〃	1.2	7	24	M	246	8	28	50.0	1.5			○	0.67	3.6		1.02
〃	1.0	8	26	F A	326	8	31	52.0	1.5			○	0.13	15.0		0.65

8章 大規模コンクリート格納施設における ひびわれ防止方法に関する研究

8.1 研究目的

コンクリート構造物の近年における高度な利用分野の一つとして、原子力発電施設、LNGタンク、上下水道施設のように貯蔵あるいは、格納機能を有する構造物がある。これらの構造物は、鋼製あるいは樹脂製のライナーやメンブレンが設けられる場合が多いが、コンクリート構造においても2次的に高度な気密性、水密性が期待されている。従って、施工にあたって水和熱によるひびわれについては十分な配慮が要求される。

本章では、このような構造物のひびわれ防止を目的とした材料の研究、および5章で提案した解析法を用いた対策立案のための検討結果について述べる。

マスコンクリートのひびわれ防止のために、まず検討されるべきは経済効率から考えても、材料、配合である。8.2節においては、水和熱の低減をはかるために考えられた、中庸熟フライアッシュセメントを結合材とし、流動化剤により単位セメント量の低減を図ったコンクリートについて述べる。この種のセメントは、ダムには用いられた事があるが、特性についてのデータは極めて少い。ここでは、このような材料に対する基本的特性や、使用上の問題点を明らかにすることを目的とした。

また、8.3節では、このような構造物の構成要素であるベースマット、および円筒壁を対象としてシミュレーション解析を行い、5章で述べた方法の展開の適用性を検討するとともに、留意点や対策を具体化し、施工計画上の資料を与えることを意図した。

なお、8.2節の一部は、関西電力より受けた委託研究の成果を引用させて頂いたものである。

8. 2 中腐熟フライアッシュセメントおよび流動化剤を使用したコンクリートに関する研究

8. 2. 1 実験概要

マスコンクリートのひびわれ防止あるいはひびわれ幅を制御する方法は表-8. 1に示すように大別される。施工上の対策において、ブリーキングおよびパイブリーキングは有効な手段であるが、一般的には非常に高価であり、通常のマスコンクリート工事では採用が困難である。また設計上では目地や鉄筋でひびわれを制御する方法がある。(1)~(3) 前者については面外力を主として受ける壁状構造体に極めて有効であるが、一体性を要求される構造体では採用することはできないこと、後者においては、多量の鉄筋量となると共に、ひびわれを分散させるよりも目地等で集中させた方が経済的かつ保守性が良いとする異論もある。

このような観点から、材料、配合上の配慮が第1に考えられるべき性質のものである。ここでは水和熱を低減するために、中腐熟フライアッシュセメントを使用し、さらにセメント量低減のための流動化剤を併用したコンクリートのフレッシュコンクリートの性質、断熱温度特性および硬化コンクリートの性質を検討し、ひびわれ防止上の有効性、および高度な構造用コンクリートとしての適用性を検討した結果について述べる。

8. 2. 2 使用材料および配合

- ・セメント：セメントは中腐熟ポルトランドセメントを用いた。このセメントの物理的性質は表-8. 2に示す。
- ・フライアッシュ：表-8. 3に示す化学成分および物理的性質を有するフライアッシュをセメント量の内割で20%用いた、中腐熟フライアッシュセメントの物理的性質を表-8. 4に示す。
- ・骨材：細骨材には山砂と細砂を3：7で混合したものを、粗骨材には硬質砂岩を母岩とする碎石を用いた。これらの骨材の物理的性質を表-8. 5に示す。
- ・混和剤：AE減水剤として日曹マスタービルダーズ社製ボゾリスNo 8を、流動化剤として竹本油脂製ハイフルードを用いた。
- ・練混ぜ水：水道水を使用した。
- ・配合：水セメント比($w/c+f$)を50%とし、30分後のベースコンクリートのスランプ、空気量を各々 7 ± 1.5 cm、 $3.5 \pm 1\%$ 、流動化後のスランプを 15 ± 1 cmとなるよう単位量を定めた。配合を表8. 6に示す。

8. 2. 3 実験方法

温度10、20、30℃の環境下でコンクリートの練りまぜを行い、スランプ、空気量、フリージングのフレッシュコンクリートの特性、および断熱温度上昇試験を行った。また引続き10、20、30℃の水中で養生を行い、材令7、28、56、91および180日の圧縮強度およびヤング係数を測定した。

なお練りまぜには可変速型傾胴型ミキサを用い、ベースコンクリートの練りまぜ後、25分間低速でアジテートし、流動化剤の添加、高速攪拌を経て流動化コンクリートを製造した。

上記の実験の他、一部に同一の材料を用いて水セメント比、フライアッシュ混入率を変えた場合の強度発現特性を調べた。

8. 2. 4 試験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの測定結果を表-8. 7に示す。練り上り温度にかかわらず単位水量を一定としたため、30℃ではスランプが他の場合よりも1.5cm小さい値を示したが、いずれの配合もプラスティシチに富む良好なワーカビリティを示した。

流動化剤の添加量は、使用量をスランプ1cmあたりセメント量の0.06%として、練り上り温度に応じて調整を行えばよいことが分る。

また30分後に所定の空気量を得るためのAE剤量は通常の3～4倍必要としたが、この原因はフライアッシュ中の未燃炭素による吸着のためと考えられ、フライアッシュを含むこの種結合材の使用にあたっては十分な管理が必要である。図-8. 1にフリージングの結果を示す。すべての配合に遅延型混和剤を用いたため、特に冬期においては凝結遅延のためフリージングが多くなっているものを除けば、その他のセメントを用いたデータに比べて、ほぼ同程度であるといえる。

(2) 断熱温度上昇

図-8. 2に断熱温度上昇試験結果を示す。これによると流動化剤の影響はほとんどないことがわかる。図-8. 3には試験結果を θ 関数で回帰した場合の終局値(K)および速度係数(α)と練り上り温度の関数を示す。従来、終局値は練り上り温度が高くなると小さくなるとされているが、ここではほぼ一定値を示した。速度係数は練り上り温度とともに大きくなるが、文献⁽⁶⁾に比べると特に高温域で小さい値を示した。図-8. 4にセメントの種類が断熱温度上昇量に及

ばす影響を示す。ただし、今回試験した材料以外は本実験と同一の試験装置を用いた試験結果を文献⁽⁷⁾より引用したものである。これによると練り上り温度および水セメント比はほぼ等しく、単位セメント量では上記の材料が最大であるにもかかわらず、温度上昇量は最小値を示していることがわかる。表-8.4のセメント試験でも発熱量が少ないことが認められ、マスコンクリートのひびわれ防止上有効な材料であると考えられる。

(1)(2)に示したように流動化剤の使用により、コンクリートの品質に影響を与えることなく、スランプを約7cm変化させることができる。水セメント比とスランプを同一とした通常のコンクリートに比べ、20kg/m³以上のセメント量を低減が可能となり、温度上昇では2~3℃の抑制となる。

この温度はパイプクーリングの効果にも相当することから、⁽⁸⁾流動化剤はマスコンクリートのひびわれ防止方法として有効な一手段と思われる。

(3) 圧縮強度

10、20、30℃で養生したコンクリートの材令26Wまでの圧縮強度およびヤング係数の測定結果を表-8.8および図-8.5に示す。当然、練り上り、養生温度が高いほど早期強度は高くなるが、30℃では材令13週以降の伸びがほとんどみられず、材令26週では20℃養生コンクリートの方が高くなっている。しかし、高野らの研究⁽⁹⁾における普通セメントの場合と比べると30℃においても著しい低下とはなっていない、このような低発熱性セメントの特長の一つと考えられる。

10、20℃においては図-8.5に示すように、他のセメントに比較すると、材令4週以降の伸びが大きく、後述するようにマスコンクリートにおけるひびわれ防止の観点からも、また経済性からも、この種セメントを用いる場合には設計基準強度を判定する材令は8週、13週のように長期に設定すべきと思われる。本セメントを用い、材令13週としたときには、水セメント比50%で圧縮強度400kg/cm²を得ることも可能である。

図-8.6は、これからの強度試験結果をもとに、積算温度の対数値と強度の関係を示したものである。図より明らかなように極めて長期を除き、打設温度にかかわらずほぼ一本の直線で表わされることがわかる。この結果は、第4章で得られたものと異っているいが、材料や基本配合の差以外にその理由は考えられず、今後さらに検討が必要である。

図-8.7は、同様の材料を用い、フライアッシュの混和量の限界を知るために別に行った実験の結果を示したものである。すなわち、フライアッシュの内割混和率を0、20、30%としたときの水セメント比40、50、60%各々のコンクリートの材令と強度の関係を示す。図より明らかなように、フライアッシュ

ユの混和は長期強度の増加に有効であり、長期材令では混和率20%以内であれば、中庸熟セメント単味の場合とほぼ同一の強度が得られることがわかる。またベースマットのように特別に脱型のために早期強度とすることが必要なく、所要強度の比較的低いものでは、フライアッシュの混和率を30%とすることも、発熱量抑制の観点からは検討に値するといえよう。Huberも30%のフライアッシュの混入を、水和熱も小さく、長期強度と伸び能力に優れていることから推している。⁽¹¹⁾

8.3 熱応力シュミレーション解析によるひびわれ防止対策の研究

8.3.1 底盤における検討

(1) 概要

このような格納施設においては、一般に厚さ 4～8m にもおよび底盤（ベースマット）が、熱荷重、外荷重と耐震上の観点から設けられる。また機能上は水密性や気密性を要することから、水和熱によるひびわれに対しては、多くの対策が実施される。ここでは前節で述べた低発熱セメントを用いると共に、セメント量を減じ、さらにリフト厚さを2mに制限したとして、なお必要とされる温度制御について検討を行う。併せて、このような積層打設を行った場合に生じる熱応力分布について考察を加える。

(2) 解析方法

(a) 対象としたベースマット

図-8.8のように全高9.5mのベースマットが2mリフト4層、1.5mリフト1層で打設される場合を想定する。各リフトの長さは高さの8倍程度で十分長く、拘束度は先に示したACI207委員会の方法が適用できるものとする。コンクリートの打設は第1層が5月始めに打設され、リフト間の打設インターバルは20日であるものとする。

(b) 温度解析条件および方法

$$\text{外気温: } T = 14.5 + 11.5 \sin \left\{ \frac{2\pi}{360} (t-120) \right\}$$

で与えられる年変化があるとする。またリフト上面の熱伝達率は $12 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ とする。

境界条件：地盤EL下5mの位置に 15°C の不変層があるものとする。

コンクリートの熱的性質：熱伝導率は $2.2 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$
熱拡散係数は $0.09 \text{ m}^2/\text{day}$ とする。

断熱温度上昇：打設温度によって変化するが、ここではセメント量
275 kg/㎡とし、

$$T = 36.4(1 - e^{-0.829t}) \text{ で表わされるものとする。}$$

コンクリート温度：CASE 1ではクーリングを行わない場合、

CASE 2では夏期にプレクーリングを行うものとし、
次のように設定する。

ケース \ リフト	1	2	3	4	5
1	20.0	22.5	25.0	29.0	32.0
2	20.0	22.5	25.0	25.0	25.0

解析方法：差分法による一次元解析。ただし、新リフトが打設されるごとに、その要素が追加されるようプログラムされたダム用積層打設温度解析プログラムによる。

(c) 応力解析条件および方法

岩盤：ヤング係数は $5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ とする。

コンクリートの性質：28日強度は 240 kg/cm^2 とし、圧縮強度の発現率 f は、洪の提案に従い次式によるものとした。

$$f = \frac{\log(H+100) - 2.072}{0.00773} \quad (H \leq 210 D \cdot D)$$

$$= \frac{\log(H-100) - 1.058}{0.0181} \quad (H > 210 D \cdot D)$$

ヤング係数、引張強度の伸張は次式によった。

$$E_c = 2.10 \times \sqrt{\sigma_c}$$

$$\sigma_{ct} = 0.12 \sigma_c$$

またクリープはCEB/FIP式によるものとし流動に関する基本クリープ係数は1.3とした。

解析は第4、5リフトを対象とし、5章で述べた方法のうち、単純拘束モデルを発展させた方法により解析を行う。

すなわち、図-8、9に示すモデルを用いて、リフト間の応力の伝達をも考慮すると共に、各リフトは3～4要素からなるものとした。

(3) 解析結果および考察

(a) 温度

ケース1、2各々について第4リフト打設以降の温度分布の変化を図-8、10、11に示す。各リフトにおいて打設後、最高温度は中心より下部に現われること、クーリングにより最高温度も約4℃減少することがわかる。また最高温度に達した後は、外気への熱放散が卓越するため、下部に高い直線分布となり、この温度変化が自重、付着により拘束された場合には軸力とともに、その拘束による曲げの作用が大きくなるものと推察される。

(b) 応力

ケース1、2の応力分布の変化を図-8、12、13に、応力度の時間的変化を図-8、14、15に示す。

第4リフトにおいては、打設後、最高温度となる時点では、中心部で最大となる圧縮応力が現われ、上面においても外部拘束による圧縮応力が大きいために、内部拘束による引張応力が打ち消され、ほぼ無応力となっている。冷却に伴い全体的に引張応力が作用し、打設後20日においては、中心部で引張強度に近い大きな応力が作用する。

この上に第5リフトが打設されると、第5リフトの初期圧縮応力の反作用としての引張力および、温度分布の変化により複雑な応力分布となる。すなわち、第5リフトに近い表面部では圧縮応力となる一方、中心部の引張応力は増加することがみられる。これは各リフトを独立に解析した場合には見られない現象であり、場合によっては上部リフト打設によってひびわれが入りうることを示している。従って積層打設する場合のひびわれ発生を精度よく解析するには、ここで行ったような解析が必要であることがわかる。

このことを示唆する測定例として、厚さ2.7mの壁状構造物がある。ひびわれ対策として、中層熱セメントの採用、リフト高さは2mとする制限を行った。図-8、16は、第2リフトに埋設したカールソンひずみ計の測定結果を示したもので、⁽¹²⁾ 横軸に打込みからの温度変化を、縦軸には全ひずみを示したものである。温度の上昇、降下時は第1リフトの拘束

により自由変形よりもかなり小さいひずみとなっているが、ひずみに急変部はみられない。しかし、第3リフトを打設後、ひずみ変化が急変していることが認められ、しかも目視でもそれまで観測されなかった最大幅0.1 mmのひびわれがみられた。

ケース1および2の比較から、ブレクーリングを行うことにより4.5 kg/cm²の応力低減が行われており、ケース1では引張強度に近い応力が発生し、ひびわれの危険性もあるものが、クーリングによりかなり危険性が緩和されることがわかる。

(13)

渋谷らは、大形振動台の施工において、単位セメント量を260 kg/cm³以下にし、打込み温度を夏期30℃以下となるよう夜間打設を行って、ひびわれ防止を行っている。本解析結果からもベースマットのひびわれを完全に避けるためには、材料の発熱抑制の他に、コンクリートの冷却についても配慮する必要があることを示している。

8.3.2 円筒壁における検討

(1) 概要

この種格納容器においては、先述のようなマッシュパなベースマット上に厚肉の円筒壁が打設される。円筒壁はいくつかのリフトに分割されて施工されるが、特にベースマットからの立上り部においては拘束が大きく、先述のような低発性セメントの使用だけではひびわれを避けることは困難であり、リフト分割、セメント量減少、ブレクーリング等の対策をも併用する必要がある。ここでは、5章に示した方法によりシミュレーション解析を行い、各種対策の効果について考察する。

(2) 円筒壁の拘束度

ベースマット上に打設された円筒壁の温度変化が生じた場合の拘束度は、FEMを用いれば詳細に求めることができるが、次のように推定できる。すなわち、円筒立上り部ではこれに囲まれたベースマット全体が拘束体として作用するため、第3章の3次元解析からも予測されるように、ほぼ完全拘束であるとみなすことができる。

次に数層の円筒リフトが打設され、この上に新たにコンクリートが打設される場合の拘束度について推定する。図-8.17のように、新設コンクリートの熱収縮が拘束されるときに生じるせん断力を Q_0 とする。長い円筒での変位 w は K

を板剛性、 $\beta = 3(1-\nu^2)/h^2a^2$ として、 $Q_0/2\beta k$ で与えられる。変位が新旧コンクリートの打継目で等しいとすると

$$\alpha \Delta T a - \frac{Q_0 a^2}{E h h'} = \frac{Q_0}{2 \beta^3 k} \quad \text{----- (8.1)}$$

$$Q_0 = \frac{\alpha \Delta T a}{\frac{a^2}{E h h'} + \frac{1}{2 \beta^3 k}} \quad \text{----- (8.2)}$$

拘束度は次式で与えられる。

$$R = \frac{Q_0}{\frac{E \alpha \Delta T h h'}{a}} = \frac{a}{a + \frac{E h h'}{2 \beta^3 k a}} \quad \text{--(8.3)}$$

いま、 $a = 21.5\text{m}$ 、 $h = 1.3\text{m}$ 、 $\nu = 0.17$ とすると、
 $\beta = 2.47 \times 10^{-3}$ 、 $K = 5.65 \times 10^{10}$ であり、

$h' = 3\text{m}$ の場合、 $R = 0.402$

$h' = 2\text{m}$ の場合、 $R = 0.502$

$h' = 1\text{m}$ の場合、 $R = 0.669$

となる。

このように基部に比べて円筒上部リフトでの拘束度は相当緩和されること、リフト高を大きくした方が拘束度は小さくなることが分る。

(3) 円筒基部に生じる応力のシミュレーション解析

先に述べたように、円筒壁基部において拘束が大きいため、拘束度を1.0として、リフト高、打設温度を変化させた。

表-8.9に示す5ケースについて解析する。すなわち、ケース1～3は春季の打設でリフト高さを1～3mに変化させたものである。ケース4～5は、リフ

ト高さ1mで夏季に打設した場合であるが、ケース5ではブレーキングにより
温度を5℃冷却し、25℃としたものである。

(a) 解析条件

温度解析におけるメッシュ分割：リフト高1mについて図-8.18に示す。
メッシュ分割は20cmとする。

熱的性質：コンクリートの熱拡散係数： $3.33 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{hr}$
熱伝導率： $2.3 \text{ kcal}/\text{mhr } ^\circ\text{C}$
外気との熱伝導率： $8 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{hr } ^\circ\text{C}$

コンクリートの断熱温度上昇 $T = K(1 - e^{-\alpha t})$
 $T = 48.7^\circ\text{C}$
 $\alpha = 0.766/\text{day}$

中腐熟フライアッシュセメントにおいて $C = 400 \text{ kg}/\text{m}^3$ として定めた。

境界条件：岩盤の温度：外気温と同一とし、底面では固定
コンクリート面：外気と接する熱伝達境界とする。

物理的性質：コンクリートの28日強度 $370 \text{ kg}/\text{cm}^2$
引張強度 $1.59 \sqrt{f_c}$
ヤング係数 $2.1 \times 10^4 \sqrt{f_c}$
材令と強度の関係：水セメント40%として
拱式より求める。

(b) 解析法

温度は差分法により、応力は単純拘束モデルを用いた5章に示した方法
により解析したコンクリート部の要素は縦方向に6分割し、各々の要素の
温度履歴は、温度解析で得た1/2の高さにおける値を用いた。

(c) 解析結果および考察

壁の中央近傍の温度履歴の一例を図-8.19に示す。

中心部における最大の応力、強度履歴の一例を図-8.20に示す。

以上の5ケースの解析結果をまとめて表-8.10に示す。これらの解析
の結果、次のような点が明らかである。

ケース1～3の結果から、①円筒壁立上り部においては、リフト高さを制御することは効果があるが少なくとも1m以下とする必要があること②1m以下としてもひびわれを完全に防止することは、このような低発熱材料を選定しても困難であることがわかる。②に対しては、さらにセメント量を減じたり、フライアッシュの混和率を増加させることにより発熱を抑制すること、春季においてもプレクーリングを実施すること、設計上、配筋や目地を考慮すること等を実施する必要がある。夏季を想定したケース4、5から、春季よりひびわれの危険度は増すが、プレクーリングによって打設温度を5℃低減すれば、発生応力も7kg/cm²減少でき、ひびわれの危険度をかなり小さくできることがわかる。

以上のように、ベースマットから立上り円筒壁において、特にプレストレストコンクリートのように高強度が要求される場合には、ひびわれを完全に避けることは困難であり、材料、配合上の配慮の他、リフト制限やクーリングが前提となることが明らかとなった。

8. 4 結語

中庸熟セメントにフライアッシュを混合した流動化コンクリートは、格納施設のような高機能を要求される構造物に用いることが分った他、次の特性が明らかとなった。

- (1) フライアッシュ混入中庸熟セメントは、発熱が小さいことから、この種格納施設の水和熱によるひびわれ防止に有効な材料である。但し、この材料を用いる場合には、フライアッシュの過大なA E 剥離を防止するため未炭素に注意すること、長期強度の発現が大きいことから、設計基準強度判定材令を長期に設定する等の配慮が必要である。
- (2) 流動化剤は品質に悪影響を与えることなく、セメント量を低減できることから、マスコンクリートには有効な材料である。
- (3) 打設時および養生温度が10～30℃の範囲では、高温では材令90日以降の発現が悪い傾向がみられるものの、全体的には積算温度の対数値と直線関係にあるといえる。

格納施設におけるベースマット部と円筒格納部について、熱応力のシミュレーション解析を行った結果、次の諸点が明らかにできた。

- (4) 5章で提案した方法は、ベースマットのように積層打設する場合のソフト間の力の伝達を考えた解析に拡張できる。この解析結果から、上部のリフトが打設されると引張応力が増加し、場合によってはひびわれを誘引することがある。
- (5) ブレーキングにより、打設温度を低くすることは、応力低減に有効で1℃あたり、1k σ /cm²前後の効果が予測された。
- (6) 格納施設のベースマットからの円筒壁立上り部の拘束度は大きい、一般部においてはかなり低減される。
- (7) 立上り部においては、1m以下にリフト高さ制限を行う必要がある。この部分においては、材料、配合上の配慮だけではひびわれを完全に防止することは困難で、クーリング、リフト制限を併用することの他、場合によっては配筋、目地等の設計上の配慮も必要となる。

【参考文献】

- (1) ACI 207 Committee: Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete, Jour. of ACI, pp.145~172, July 1973
- (2) F. Leonhardt: Ubar die Kunst des Bewehrens von Stahlbeton Tragwerken, Beton -und Stahlbetonbau, Heft 8, pp.181- 192, Aug. 1965
- (3) BS 5337.: Code of Practice for the Structural Use of Concrete for Retaining Aqueous Liquids, 1976
- (4) C.D. Turlon,: To Crack or not to Crack, Concrete, pp.32-36, Nov. 1974
- (6) 塚山: マッシブな鉄筋コンクリートの温度上昇ならびに温度ひびわれに関する基礎研究, 学位論文, 1974
- (7) 西他: 各種セメントを用いたコンクリートの性状, 小野田研究報告, 第32巻, 第103号, pp. 25-38
- (8) 米沢他: マスコンクリートの熱応力によるひび割れについての現場実験, 土木学会年次学術大会講演会概要集, pp.107-108, 昭53.9
- (9) 高野: 打ち込み温度がマスコンクリートの強度に及ぼす影響の研究, 土木学会論文集, 第26号, 昭30. 5
- (11) H. Huber: Kolnbreinsperre-Neue Wege in der Technik des Massenbetons Beton-und Stahlbetonbau, 74-5, pp.117-124, 1974. 5
- (12) 山本他: マスコンクリートの水和熱対策とその効果、竹中工務店改善事例発表会, 1976
- (13) 渋谷他: 大型高性能振動台基礎コンクリートの施工、コンクリート工学、Vol. 17, No. 10, pp. 30-38, 1979, 10

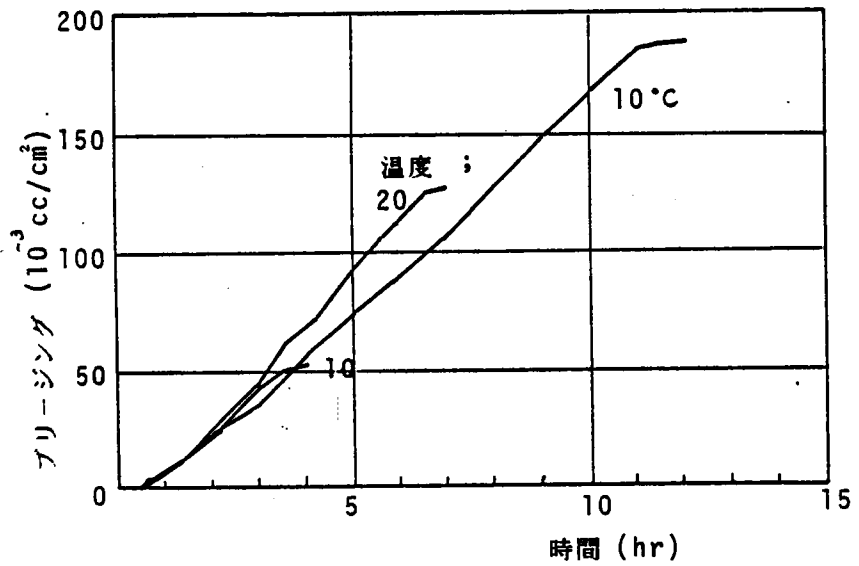


図-8. 1 ブリージング量測定結果

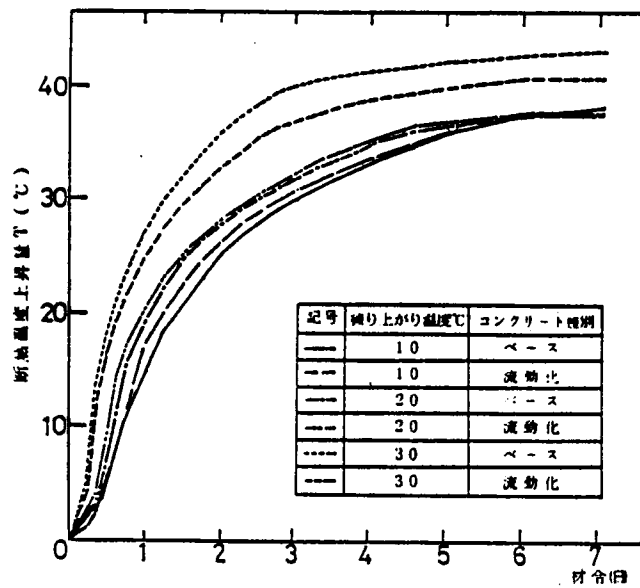


図- 流動化剤および繰り上がり温度が断熱温度上昇におよぼす影響
8.2

図-8. 2 断熱温度上昇試験結果

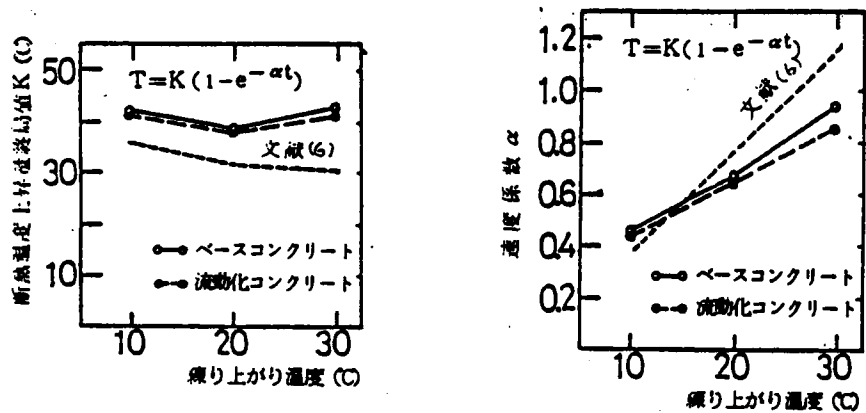


図-8.3 断熱温度特性値

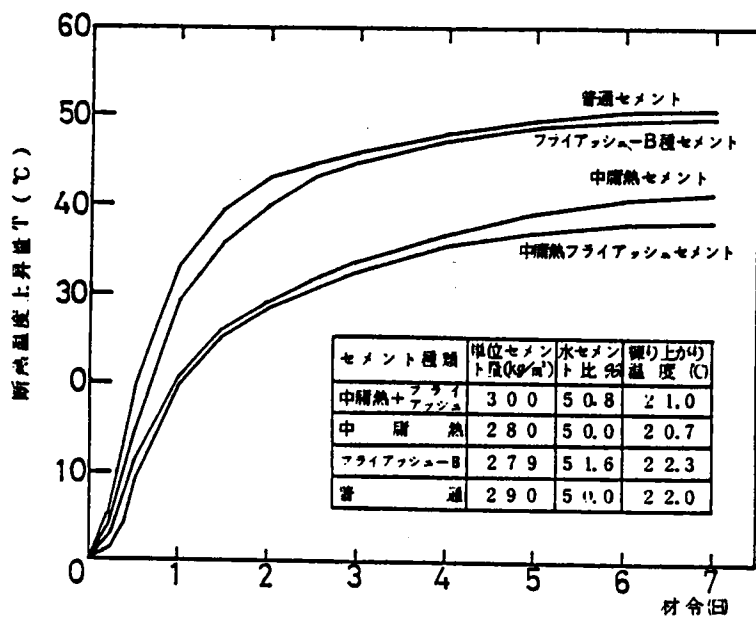


図-8.4 断熱温度上昇の比較

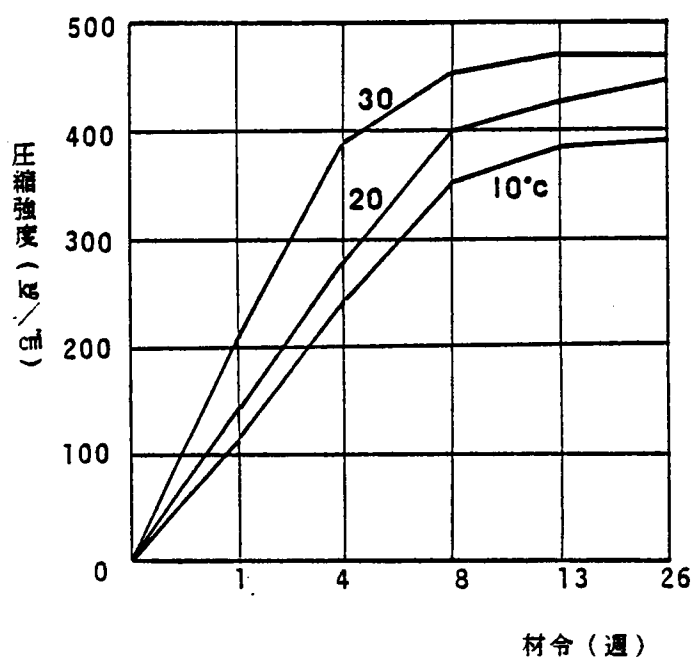


図-8. 5 圧縮強度と材令の関係

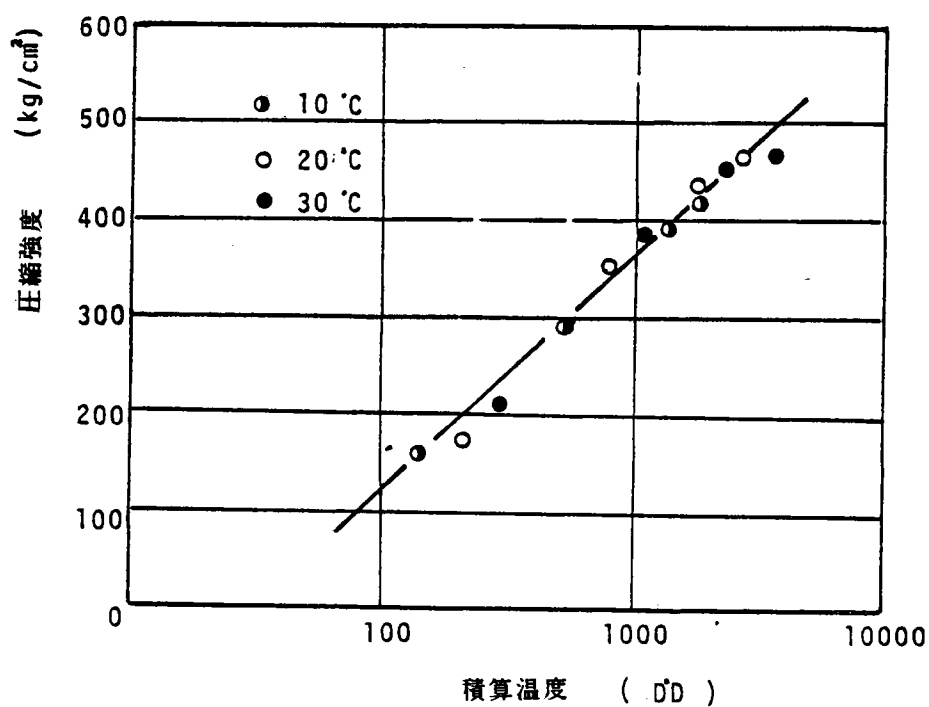


図-8. 6 圧縮強度と積算温度との関係

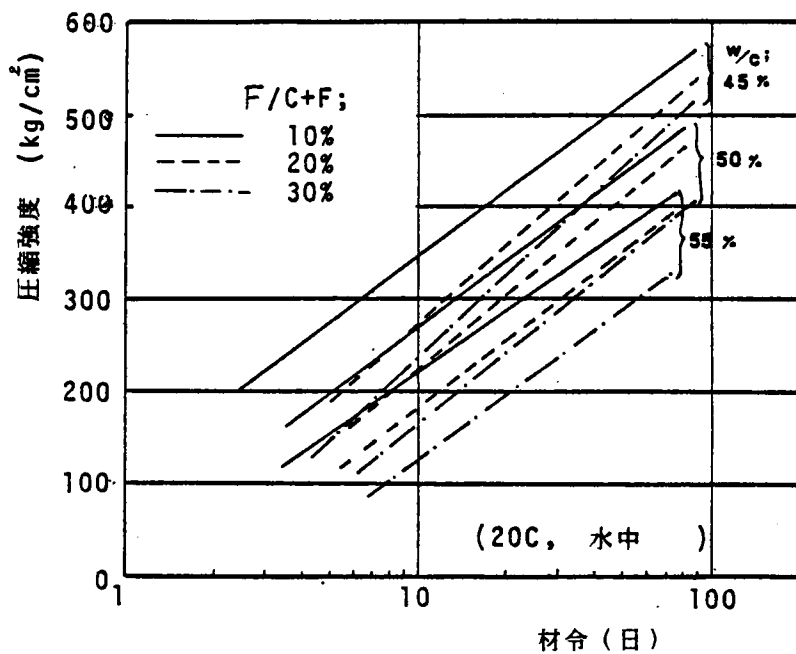


図-8.7 フライアッシュ混入比が異なる
中庸熱フライアッシュセメントの 強度発現特性

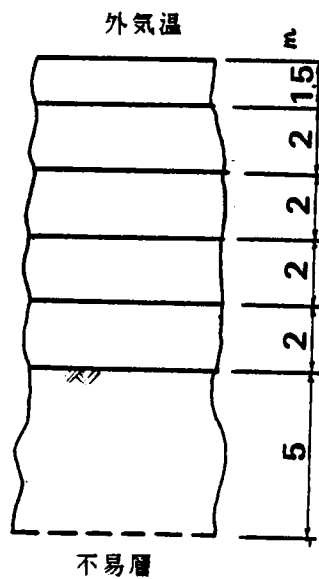
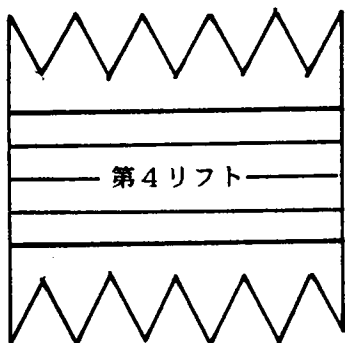


図-8.8 対象ベースマット

第3リフト以下の拘束に
相当するバネ



第5リフトを拘束する
剛性から、第4リフト
の剛性を引いたバネ

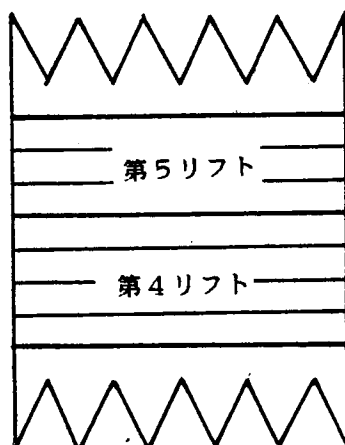


図-8.9 ベースマットのモデル化

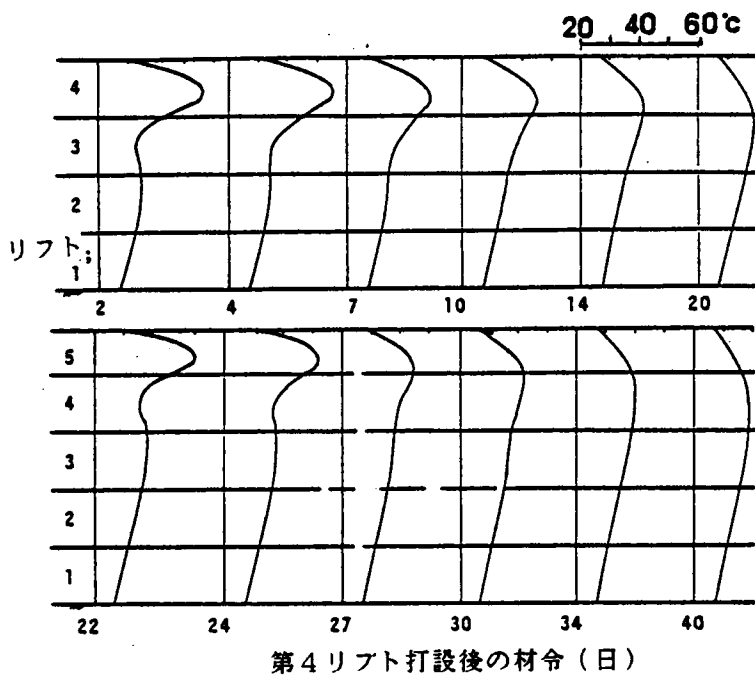


図-8.10 温度分布 ケース 1

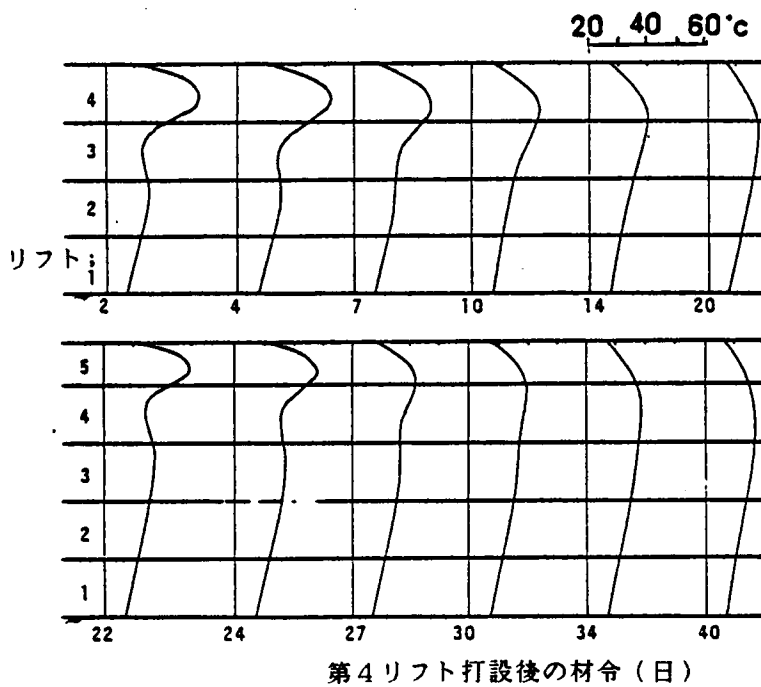


図-8.11 温度分布 ケース 2

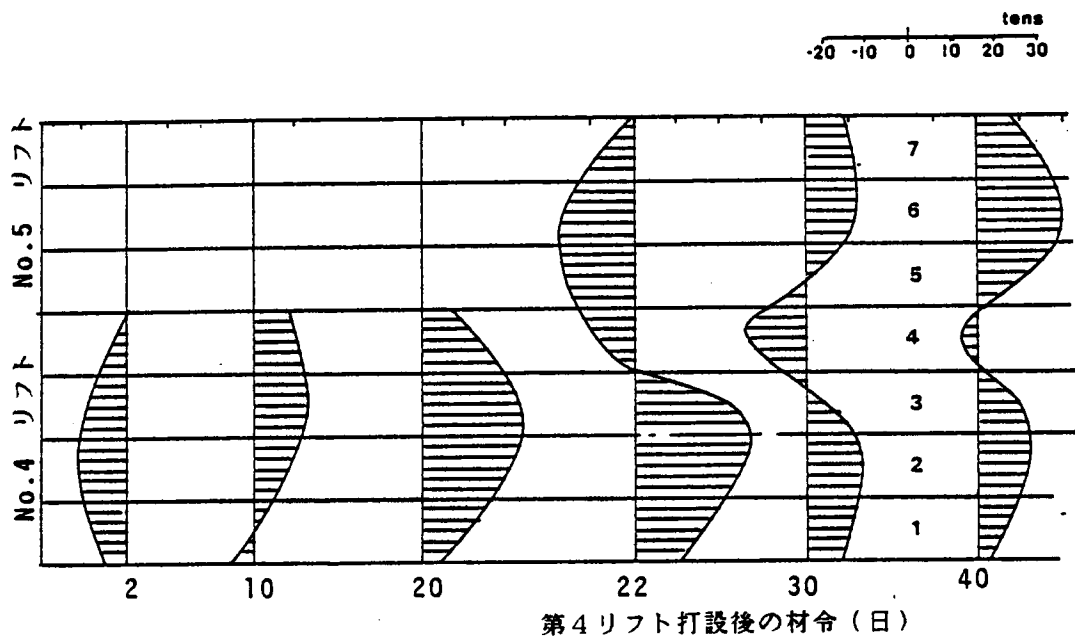


図-8. 1 2 応力分布の変化 (ケース 1)

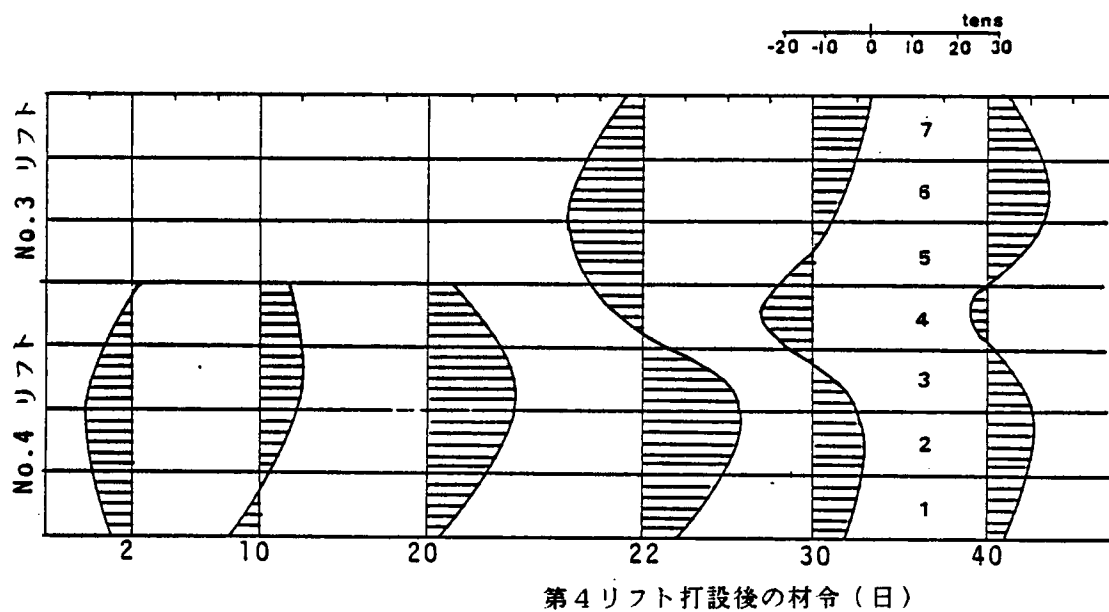


図-8. 1 3 応力分布の変化 (ケース 2)

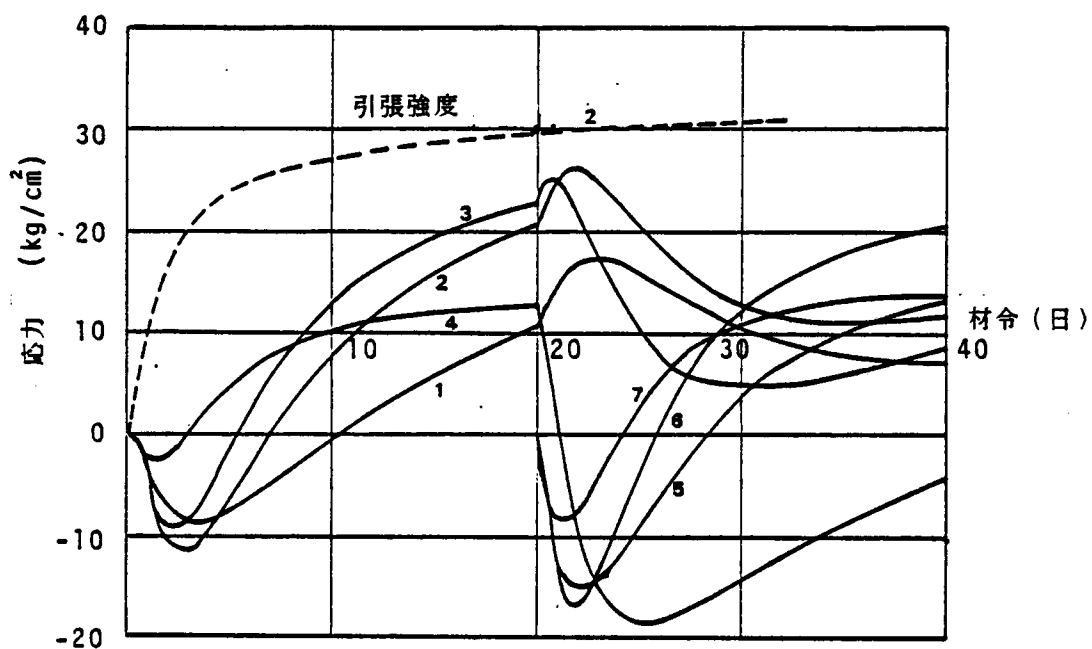


図-8.14 応力の経時変化 (ケース 1)

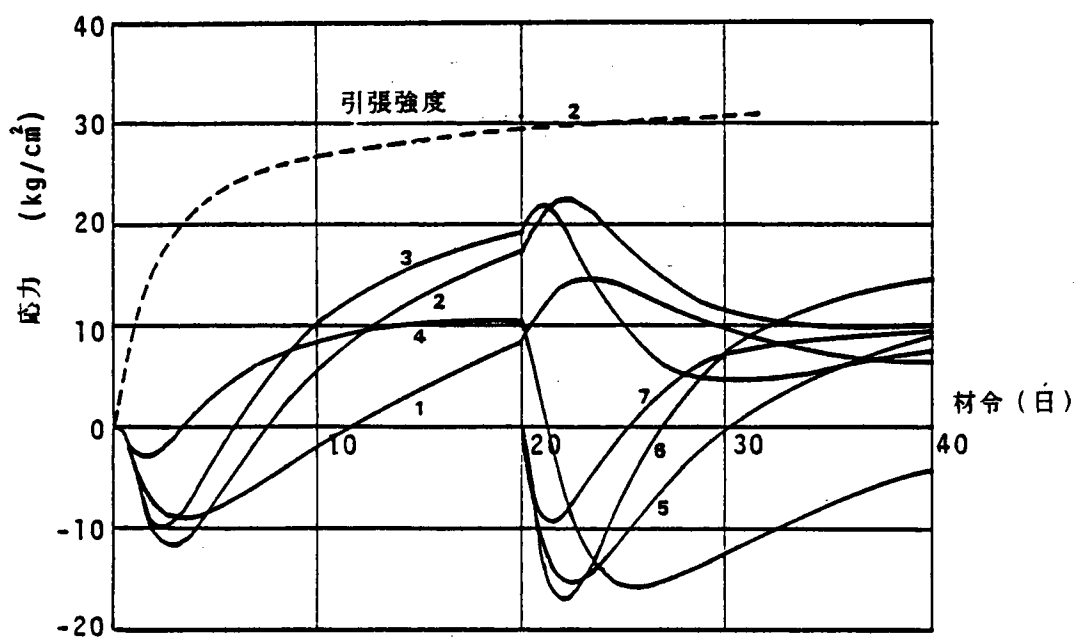


図-8.15 応力の経時変化 (ケース 2)

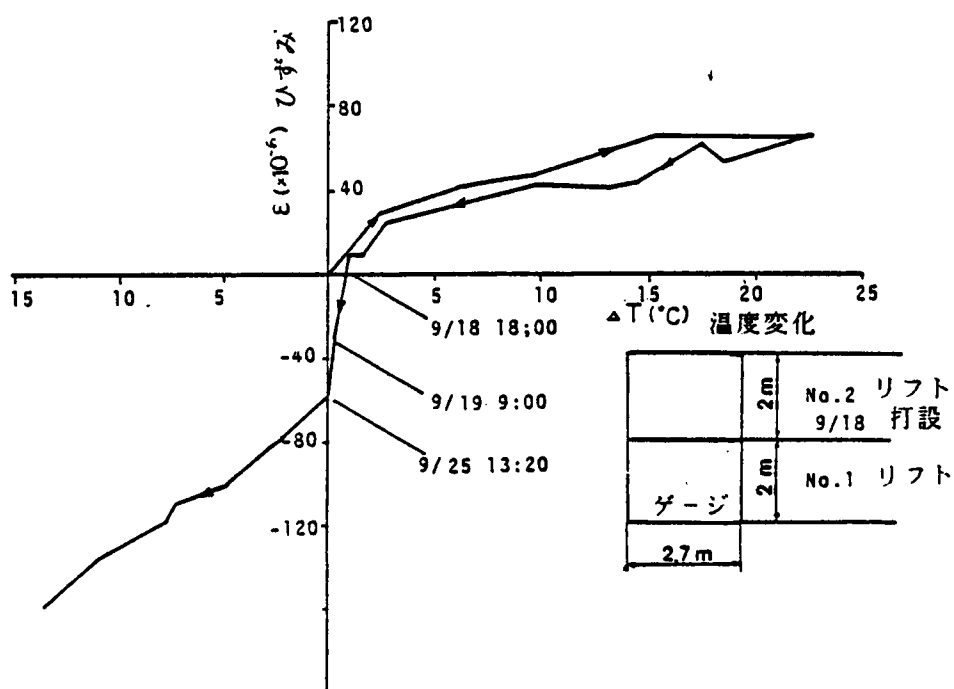


図-8.16 カールソンひずみ計，測定結果

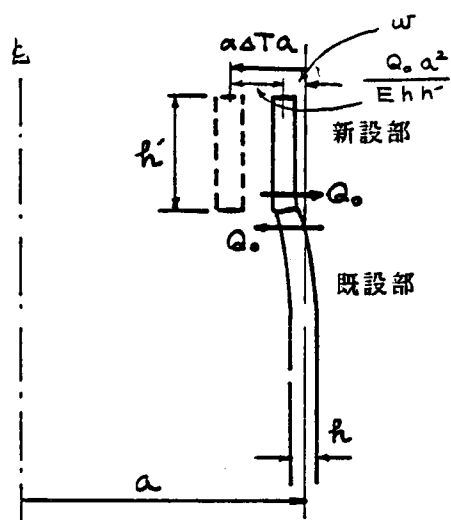


図-8.17 円筒上部での拘束形態

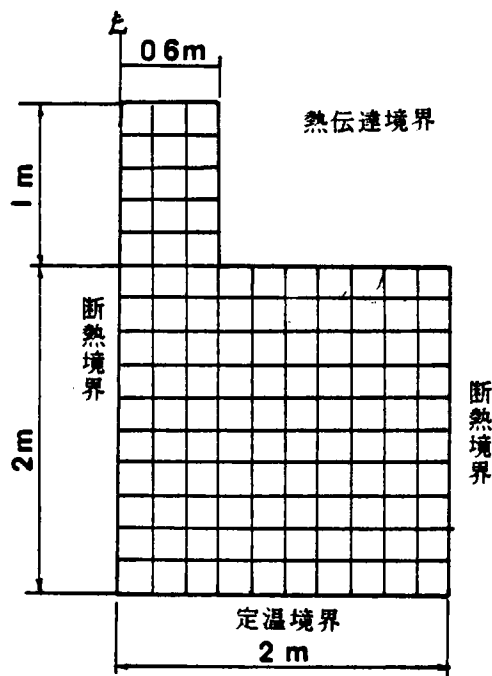


図-8.18 温度解析のメッシュ分割

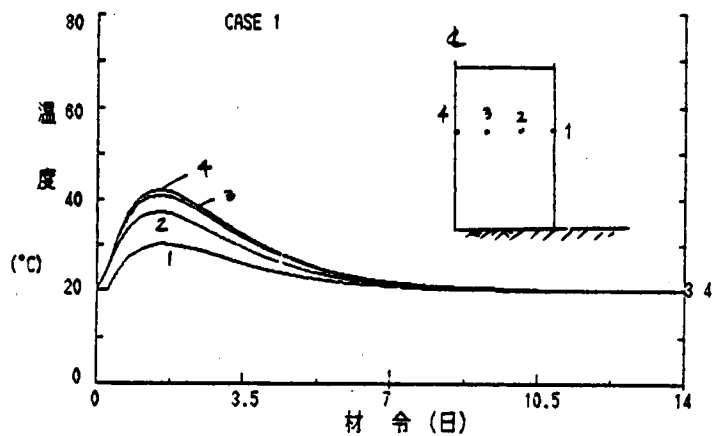


図-8.19 コンクリートの温度履歴(接点番号-)

図-8.19 温度履歴計算例

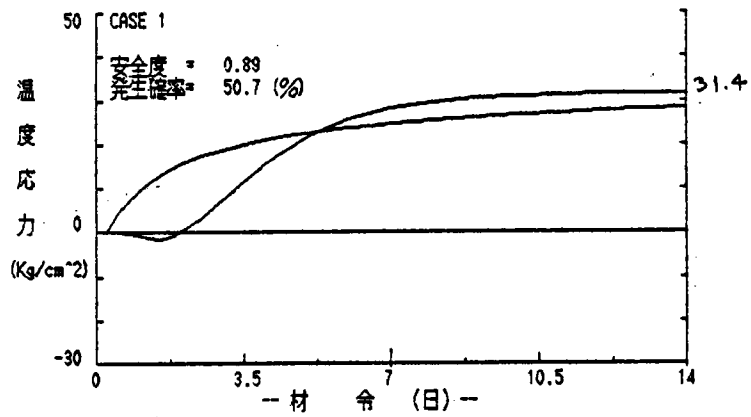


図 - 応力と材令の関係 (要素番号 - 3)

図 - 8. 20 中心部の応力と強度履歴計算例

表-8. 1 ひびわれの防止対策

方 策	具 体 的 な 対 策
配 合	<div> <div>1) 低熱性セメントの使用</div> <div>2) セメント量の低減</div> </div> <div> <div> a) 良質の水和剤(材)を使用する b) スランプを小さくする c) 骨材粒径を大きくする d) 良質な骨材を用いる e) 強度安定の材料を延長させる f) その他 </div> </div>
施 工	<div>1) 温度変化を小さくする</div> <div>2) 施工上から温度上昇を低減する</div> <div> a) 保溫(シート・断熱材)・加熱養生 b) パイプワーリングする c) リフト高(厚)さを低減する d) 材料をプレワーリングする e) その他 </div>
設 計	<div>1) 設計上から配慮する</div> <div> a) 可能な部材は、目地を設ける b) 数層で、ひびわれを分散させる c) 防湿、防水処理する d) その他 </div>

表-8. 2 中熱ポルトランドセメントの物理的性質

比 重	粉末度		凝結			曲げ強さ			圧縮強さ			水和熱	
	ブレン	88μ残分	水量	始発	終結	3日	7日	28日	3日	7日	28日	7日	28日
	(cm^3/g)	(%)	(%)	(時分)	(時分)	(kg/cm ²)			(kg/cm ²)			(cal/g)	
3.20	3150	1.0	27.5	3-20	4-25	30	42	63	105	146	347	64.5	76.9

表-8. 3 フライアッシュの試験結果

比重	粉 末 度		単位水 量比 (%)	圧縮強度比	
	比表面積 (cm^2/g)	44μふるい 残分 (%)		28日	91日
2.20	3720	10.8	96	95	97

表-8.4 中層熟フライアッシュセメントの物理的性質

比	粉末度		凝結			曲げ強さ			圧縮強さ			水和熱	
	ブレン	38μ残分	水量	始発	終結	3日	7日	28日	3日	7日	28日	7日	28日
	(cm/g)	(%)	(%)	(時分)	(時分)	(kg/cm ²)			(kg/cm ²)			(cal/g)	
2.99	3390	0.9	27.4	4-05	5-35	27	35	62	98	185	267	56.0	65.2

表-8.5 骨材の物理的性質

骨材種別	比重	吸水率	単重	実積率	粗粒率
粗骨材	2.58	2.4	1.638	63.5	2.90
細骨材	2.64	1.3	1.605	60.8	7.19

表-8.6 コンクリートの配合

W/C+F (%)	s/a (%)	スランブ (cm)		単位量 (kg/m ³)						
		30分後	流動化後	W	C	F	S	G	減水剤	流動 化剤
50.0	45	7.0	15	150	240	60	825	1025	0.75	1.44

表-8.7 フレッシュコンクリートの性質

No	コンクリート 温度	フレッシュコンクリートの結果								
		練り上り直後			練り上り30分後			流動化剤添加後		
		Sl (cm)	Air (%)	Temp (℃)	Sl (cm)	Air (%)	Temp (℃)	Sl (cm)	Air (%)	Temp (℃)
1	20℃	10.5	4.9	21.5	7.0	3.2	22.0	13.5	3.2	22.0
2	10℃	10.5	5.0	11.0	7.1	3.2	12.0	15.1	3.4	12.0
3	30℃	9.1	4.9	31.0	5.8	3.4	31.0	15.0	3.7	30.5

表-8.8 コンクリートの力学的性質測定結果

No.	コンクリート 温度 (°C)	圧縮強度 (kg/cm ²)					静弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm ²)				
		1週	4週	8週	13週	26週	1週	4週	8週	13週	26週
1	20	171	301	426	453	487	2.51	2.77	3.35	3.25	3.37
3	10	160	293	399	419	441	2.50	3.03	3.08	3.18	3.00
4	30	209	389	452	470	469	2.43	3.09	3.46	3.38	3.48

表-8.9 解析ケース

	CASE 1	2	3	4	5
リフト高さ (m)	1	2	3	1	1
外気温 (°C)	20	20	20	25	25
コンクリート温度 (°C)	20	20	20	30	25

表-8.10 解析結果のまとめ

要因 \ ケース	1	2	3	4	5
リフト高 (m)	1	2	3	1	1
外気温 (°C)	20	20	20	25	25
コンクリート 温度 (°C)	20	20	20	30	25
最大温度 (°C)	41.9	48.9	50.1	53.2	48.6
最大応力 (kg/cm ²)	31.4	39.2	39.1	40.9	33.6
材令14日 引張強度 (kg/cm ²)	28.1	28.5	28.5	28.8	28.7

9.1 研究目的

マスコンクリート構造物の典型といえるコンクリートダムに対して、近年、合理化施工法の研究と実施工が世界的に盛んに行われている。日本においては、中、小規模ダムに対して、振動ローラを用いて超貧配合コンクリートを締め固め、レーア打設とするRCD工法(Roller Compacted Dam)が考えられ、島地川、大川ダムを始めとして、実績も数多く見られる状況にある。学会でも施工指針が定められ、部分的改良、開発の要素は残されているものの、工法の基本は確立されたと云える。

一方、中、小規模ダムにおいては、汎用土木施工機械による経済化の観点から、ポンプ施工法による建設(PCD工法:Pumped Concrete for Dam)が提案され、長崎県 長与ダムにおいて、本格的な施工が行われ、基本的な資料が蓄積されとともに、今後の発展が期待されている。^{(4),(5)}

ダムコンクリートは、水和熱によるひびわれ低減を図るために、出来るだけ貧配合、低スランプであることが望ましいが、ポンプ施工上からは富配合でワーカブルなコンクリートが要求される。この矛盾した要因のバランスを、材料、配合、および施工機械を含む施工上で、どう保つかがPCD工法の最大の課題である。

本研究は、長与ダムの建設に併せて行ったもので、低発熱セメントと流動化剤の使用により、上記のバランスを保つことを考え、付随する問題点の解明や、効果の確証を行う事を目的としたものである。

9.2節においては、通常のダムコンクリートが、セメント量、約180 kg/m³、基本リフト、1.5m程度で行われるのに対して、ポンプ施工法を適用する場合、セメントの種類や量、リフト厚をひびわれ防止上いかにすべきかを考察したものである。このため、第5章に述べた手法によりシュミレーション解析を実施した。

9.3、9.4節は、PCD工法におけるひびわれ防止を前提とした施工の具体的方策に関して述べたものである。9.3節においては、高炉セメントに低発熱性とポンプ圧送性の改善を目的にフライアッシュを添加した3種混合セメントと、施工性とセメント量低減を目的に流動化剤を併用した貧配合コンクリートを考え、このコンクリートの基本物性とダムへの適合性を検討した結果について述べる。

また 9.4節では、具体的にこの工法を確立するために、流動化剤が、この種ダム用貧配合コンクリートのポンプ圧送性改善にどの程度効果があるかを、現場施工実験により明らかにすることを目的として検討した結果について述べる。

9. 2 PCD工法におけるひびわれ防止対策に関する研究

9. 2. 1 解析方法

PCD工法においても、ブロック打設されるので、ある打設ブロックを取り上げ、差分法による一次元温度解析および5章に示した方法により応力解析を行う。リフト厚、セメント量および拘束度を表-9. 1に示すように変化させた6ケースについて解析を行い、PCD工法におけるひびわれ防止上のこれら施工条件について検討する。

温度解析においては、外気温および既設コンクリートが20℃となっている状態で、打設温度25℃で新たなリフトが打設された場合について行った。コンクリートの熱拡散係数、伝導率、外気との熱伝達率等の熱的性質は8章におけるものと同一とした。

コンクリートの断熱温度上昇は、セメントが中層熟セメントであるとして、文献より、各セメント量に応じて表9. 2のように定めた。⁽³⁾

応力解析において、材料定数は次のように仮定し、積算温度によって硬化促進の影響を加味した。

材令28日強度： 210 kg/cm^2 、圧縮強度の進展率：水セメント比60%、中層熟セメントにおける積算温度の供による関係式、引張強度 σ_t ： $\sigma_t = 1.56\sqrt{\sigma_c}$ 、ヤング係数 E_c ： $E_c = 2.1 \times 10^4 \sqrt{\sigma_c}$ 、流動に関する基本クリープ係数：1.3 その他の条件は8章に述べた通りとした。

拘束度は3章に述べた研究から定めた。すなわち拘束体と同幅のブロックで、ブロック長が高さの1.5倍程度とした場合で0.75、対策としてブロック長を約半減した場合で0.65とした。

単純拘束パネ法におけるコンクリート部は、5～6要素に分割して行った。

9. 2. 2 解析結果および考察

図-9. 1に温度解析結果の一例を、図-9. 2には材令による応力履歴解析結果の一例を示す。

最高温度は材令2～2.5日で現われ、10～15℃の上昇を示したあと3週ではほぼ外気温と平衡に達する。応力は、初期にはわずかな圧縮応力が生じるが、温度降下に従って引張応力となり、材令3週では、応力緩和による減少もみられず中心部で最大値を示している。

表-9. 3には、解析結果をまとめて示す。

リフト厚、1mではセメント量 30 kg/m^2 に対し、約1.5℃で最高温度が異っている。また1.5mとすると1mに比べて4℃高く、この領域ではリフト厚さ

制限が温度上昇抑制に有効であることを示している。

発生応力の低減に対しても、セメント量低減が有効であることを示しており、この例では、 $30\text{ kg}/\text{m}^3$ で約 $2\text{ kg}/\text{cm}^3$ の変化を示している。水セメントを同じとして解析し、かつ材令3週ではリフトが同じであれば積算温度に大きな差がないため、セメント量を変化させても引張強度は変わっていない。ケース1～3のひびわれ安全度の結果から、リフト厚1mで L/H が15程度では、セメント量 $230\text{ kg}/\text{m}^3$ はやや多すぎるものと思われ、ポンプ施工においても $200\text{ kg}/\text{m}^3$ 以下とするが、減らせない場合はブロック長の制限やさらに低発熱セメントの採用等を考える必要のあることを示している。ケース5、6はブロック長を半減したときに相当するが、 $230\text{ kg}/\text{m}^3$ のセメント量でも、かなり安全側となることがわかる。

ダムにおいては堤体に直角な方向のひびわれが漏水の点で有害であることから、横縫目幅（堤体正面からみたときの区画長）の決定にあたっては特に細心の注意を要しよう。

また、通常のダム施工では、岩着部等を除けば一般には1.5mのリフト厚さが採られている。⁽⁴⁾ ケース4は一般のダムと同様のリフトとしたものであるが、引張強度を越える応力が発生しており、クーリングやブロック長の制限、低発熱セメントの採用等も含めて相当の対策を実施しない限り、 $230\text{ kg}/\text{m}^3$ 程度のセメント量ではひびわれは避けられないと言えよう。

以上の事から、PCD工法は施工法としては、合理的な方法であるが、ひびわれの防止上、セメント量は $200\text{ kg}/\text{m}^3$ 程度、リフト厚は1mを標準とし、これと異なる場合はブロック長の変更や特に低発熱性のセメントを用いることなどの対策を考慮すべきであることがわかった。また5章の解析方法は、従来のダム施工で経験的に知られているひびわれ防止対策とよく適合しているといえる。

9.3 フライアッシュ混入高炉セメントおよび流動化剤を用いた貧配合コンクリートの特性に関する研究

9.3.1 実験概要

前節の結果から、PCD工法においては、低発熱セメントを用い、かつセメント量をできるだけ低減することがひびわれ防止上有効なことがわかった。ここでは、この条件に近く、しかしポンプ圧送性の向上に寄与することが期待できる材料として、高炉フライアッシュセメントおよび流動化剤をとりあげ、これらを用いたコンクリートがダムに用いるかを強度、耐久性、発熱の点から実験的に検討した。特に耐久性については新材料であることから詳細に調べることにした。

9.3.2 材料・配合および試験方法

(1) 使用材料および配合

セメントは三菱社製のB種高炉セメント（スラグ混入率38%）をベースとし、これの内割20%をフライアッシュで置き換えたものを使用した、セメントおよびフライアッシュの物理試験結果を表-9.4、表-9.5に示す。細骨材には大井産川砂を、粗骨材には硬質砂岩を原石とする愛知県鉢地山産の碎石を使用した。これらの物理試験結果を表-9.6に示す。ベースコンクリート用混和剤は、AE剤1種類（天然樹脂酸系）、AE減水剤2種類（リグニンスルホン酸塩、有機酸系誘導体）の計3種類とし、流動化剤はアルキルアリルスルフォネートを主成分とするもの1種類（表中にはSPと略記）とし、いずれも市販品を使用した。配合は、粗骨材最大寸法を60mmとし、単位セメント量（C+F）を200kg/m³、225kg/m³、250kg/m³の3種類、混和剤を3種類、およびセメント種別の比較としてB種高炉セメント単味のもの1種類（AE剤）に対し、それぞれベースおよび流動化の計18配合を実験に用いた。配合設定の基本方針は、長与ダムにおける標準配合等を参考にして、ポンプ圧送性を十分に保有するよう配慮するとともに、単位セメント量も同上配合をカバーする範囲をとることとした。目標スランプはベースで8cm、流動化後12cmとし、所要のスランプ、空気量が得られるよう試し練りにより各単位量を定めた。表-9.7にコンクリートの配合とまだ固まらないコンクリートの試験結果を示す。

圧縮強度、耐久性の検討には配合番号1~20のうち、NO.8, 11, 14および17の4配合を除く16配合を用い、発熱特性の検討にはNO.8, 11の2配合を用いた。

(2) 試験方法

ベースコンクリートの練り混ぜは、100ℓ練り可傾式ミキサーを使用し、全材料投入後3分間行った。流動化コンクリートは、ベースコンクリートの練り混ぜ後ただちに流動化剤を添加し、1分間攪拌を行って製造した。コンクリートの製造後、40mm網ふるいでウェットスクリーニングを行い、スランプ(JIS A 1101)および空気量(JIS A 1128)を測定し、圧縮強度試験体を作成した。さらに、25mmスクリーニング試料にて10×10×40cm凍結融解試験体(JIS A 6204付属書2、試験開始材令11通)および気泡間隔係数測定試験体(ASTM C-457)を作成した。また、発熱特性の検討では、1バッチ70ℓを練り混ぜ、一部を40mmふるいでウェットスクリーニングした後、スランプ、空気量の測定を行い、残りの60mmフルサイズのコンクリートを断熱温度上昇試験の試料とし、φ30×30のプリキ製コンテナに詰め、断熱温度上昇測定器で材令1通までの温度上昇の測定を行った。

9.3.4 試験結果および考察

各配合の硬化コンクリートの試験結果を表-9.8に示す。

a) 圧縮強度

表-9.8から明らかなように、水セメント比65%配合でも材令91日で300kg/cm²程度の強度が得られており、通常のダムコンクリートとしての強度は十分である。図-9.3に各材令ごとのベースコンクリートと流動化コンクリートの圧縮強度の比較を示す。本実験のようなダム用貧配合コンクリートにおいても、流動化剤の使用による圧縮強度の顕著な変化は認められず、本実験では長期材令になるほど、流動化コンクリートの圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。

表-9.8中の19, 20の配合は、フライアッシュを添加しない高炉セメントコンクリートである。フライアッシュ混入高炉セメントコンクリートの強度と比較すると、従来の報告と同様に後者は早期強度発現性は劣るが、長期の伸びは大きいことが認められ、フライアッシュの混入が後述のようにポンプ圧送性の改善や発熱量の低減に効果的であることも考え合わせると、フライアッシュ混入高炉セメントはダムのポンプ施工に有効な材料であるといえる。

b) 凍結融解に対する抵抗性

流動化コンクリートの凍結融解抵抗性については多くの研究があり、さまざまな議論が行われてきたが、最近では①十分な空気を運行させれば流動化後も十分な耐久性を有すること、②ベース混和剤や流動化剤の組合せいかんで気泡間隔係数が増加し、著しい耐久性低下を示すことがあること、③流動化コンクリートにおいては、通常よりもやや大きくても良いが、 $200\sim300\mu$ 以下の気泡間隔係数とする必要がある事、⁽⁷⁾⁽⁸⁾等が総合的なまとめとされている。

図-9. 4に本実験で得られた水セメント比と耐久性係数の関係を示す。水セメント比の増大に伴い耐久性係数が低下する傾向が認められるが、単位セメント量 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 、水セメント比65%の配合でも80%以上であり、特に厳しい環境を別にすれば、ダムコンクリートとして基本的に問題とならないことを示している。これは、今回の実験でウェットスクリーニング後も5.5%（スクリーニング前ではダム示方書に示されている3.5~4.0%よりも多い5.0%を目標）と比較的高めに設定したことが影響しているものと考えられる。しかし、流動化コンクリートとベースコンクリートを比較すると、前者の抵抗性が若干低下（最大4%）する傾向がみられる。

図-9. 5に本実験で求めた気泡間隔係数と耐久性係数の関係を示す。また、図中にはPowersの実験結果⁽⁹⁾をも併せて示す。流動化による気泡間隔係数の増加はベースコンクリートの混和剤によって異なり、比較的大きいものも認められた。測定値はPowersの測定範囲とほぼ一致しており、気泡間隔係数は $250\sim300\mu$ 以下とする必要があることを示している。

山本ら⁽⁸⁾は流動化コンクリートにおいては、通常のコンクリートより0.5%程度空気量を高めにすることを提案しているが、本実験からもポンプ圧送による低下も加味すれば流動化コンクリートにおいては1~2%程度は増加させておくのが安全であるといえる。

c) 発熱特性

表-9. 7のうち、NO. 8および11の単位セメント量が $225\text{kg}/\text{m}^3$ のベースおよび流動化コンクリートの断熱温度上昇試験の測定結果を図-9. 6に示す。前章において、流動化剤の温度上昇に与える影響はほとんどないことを認めたが、本実験においても基本的にはほとんど同等であり、影響はないと考えてよいことが明らかとなった。

断熱温度上昇を θ 関数で表示すると $T=28.3(1-e^{-0.75t})$ となり、フライアッシュ混入高炉セメントと従来の文献における他のセメントを比較すると、⁽¹¹⁾中熱セメントの断熱温度上昇とほとんど同等か、やや少ないと思われ、住吉らも述べているように、⁽⁶⁾マスコンクリート用低発熱セメントとして有効と考えられる。

今回は、フライアッシュの置換え率は20%であるが、強度的にも十分であることを考えると、PCD工法においては、さらに混入率を増加し、ポンプ圧送性の向上と発熱低減をはかることが検討されるべきと思われる。

以上の結果より、PCD工法を対象として貧配合低スランプのフライアッシュ混入高炉セメントコンクリートに流動化剤を適用し、圧送性の改善を図る場合においても、その特性はダムコンクリートとしての要求品質を満足するものであると考えられる。

9. 4 貧配合コンクリートにおける流動化剤のポンプ圧送性 改善効果に関する研究

9. 4. 1 実験概要

PCD工法においては、ひびわれ防止を考慮した貧配合コンクリートでも十分なポンプ圧送性を確保する必要がある。流動化剤は主として建築分野における実績からその手段として期待できる材料である。⁽¹²⁾⁽¹³⁾

本節では、PCD工法を想定した貧配合で、60mmの骨材最大寸法を有するコンクリートのポンプ圧送実験を行い、流動化剤の圧送改善効果を検討した結果について述べる。また前節で流動化コンクリートの品質について基本的に関題のないことを述べたが、ここでは圧送による品質の変化をさらに調べた。

9. 4. 2 使用材料および配合

2. 1 使用材料：セメントは表-9. 9に示す物理的性質を有するB種フライアッシュセメントを用いた。細骨材には海砂と砂丘砂の混合砂を、粗骨材には最大寸法40mmおよび60mmの碎石を用いた。これらの物理的性質を表-9. 10に示す。流動化剤添加前のコンクリート（以下ベースコンクリートと記す）にはAE剤を、流動化剤にはアルキルアリルスルホン酸塩高縮合物を主成分とするものを用いた。

2. 2 配合：実験に用いた配合は表-9. 11に示すように、最大寸法が40mm、60mmで単位セメント量を230kg/m³としたベースおよび流動化コンクリート（40B、40S、60B、60S、Bはベースコンクリートを、Sは流動化コンクリートを示す）の4配合、及び40mm骨材で一般のマッシュな構造物に使用されている比較的セメント量の多いベースおよび流動化コンクリート（40RB、40RS）の計6配合とした。貧配合コンクリートの所要スランプはベースで8cm、流動化コンクリートで15cmとした。試しねり試験においては運搬時間の長いことを考え、練上り後15分間静置した後の添加前後に所定のスランプ、空気量を得られるように設定した。

9. 4. 3 コンクリートポンプおよび配管

実験に使用したポンプは横型単動複列油圧ピストン式（最大吐出量、85m³/h、シリンダー径、220mm、ストローク長、1400mm）である。このポンプは吐出口径を8インチに変更するとともに、ホッパー容量および攪拌機構を汎用タイプから改良したものである。配管には8インチ管を用い、図-9. 7に

示すように、“コ”字型の水平配管の後、5 mの鉛直立上りを設けた。配管の実長は92 mであり、土木学会標準示方書による水平換算長は約170 mである。図中のP 1～P 4は管内圧力測定位置を示す。

9. 4. 4 実験方法

ベースコンクリートは生コンプラントにて製造し、4. 5 ㍓搭載したアジテート車にて運搬した。所定の流動化剤添加後、2分間の高速攪拌を行なった。各配合ごとに基準の設定吐出量を30 ㍓/hとし、3～4段階に吐出量を変化させて圧送実験を行なった。圧送時にはポンプ車のストローク数、作用油温度、攪拌油圧、主油圧および圧送時間の計測を行なうとともに、図-9. 7に示した位置に設置した圧力検出器により管内圧力の計測を行なった。圧送前後の品質変化を把握するために30 ㍓/h圧送時にポンプ車ホッパーおよび配管出口から圧送前後の試料が同一となる時期にコンクリートを採取し、スランプ、空気量の測定および材令28日、91日圧縮強度試験用供試体の作成を行なった。なお最大寸法60 mmの骨材を用いたコンクリートは40 mmふるいでウェットスクリーニングの上各試験に供した。

9. 4. 5 実験結果および考察

(1) 圧送前後の品質変化

図-9. 8に圧送前後および流動化剤添加前後のスランプ、空気量の変化を示す。流動化剤の添加量は各配合でセメント量の0. 45%一定としたが、スランプの増加量は、骨材径で差はなく約6 cmであった。この値は通常の20～25 mmの骨材を用いたコンクリートの場合に比べるとやや小さかった。圧送前後のスランプの変化は流動化コンクリートの方がベースコンクリートよりも大きいことが認められた。圧送に伴う空気量の減少はベース、流動化コンクリートで差はなく0. 2～1%であった。また流動化剤の添加により空気量が減少しているが、耐久性の観点からベースコンクリートの空気量の設定には配慮が必要と考えられる。図-9. 9には圧送前後の圧縮強度を対比して示すが、ベースおよび流動化コンクリートとも圧送による強度低下は認められなかった。

(2) ポンプ圧送性

(a) 吐出効率

吐出効率は、生コン車1台分の搭載量から各種試験に供したコンクリート量を差引いた量を、圧送に要した全ストローク数にシリンダー容量を乗じた理論上の吐出量で除した値として求めた。なお以後に述べる理論吐出量はシリンダー容量を1ストローク圧送するに要する時間で除したものであり、実吐出量はこれに吐出効率を乗じて求めたものである。図-9.10にベースおよび流動化コンクリートの吐出効率を対比して示す。これによれば、貧配合コンクリートにおいて流動化させることによる吐出効率の向上が大きいことがわかる。骨材寸法が大きくなると効率はやや劣るが、40mm骨材を用いたコンクリートでは貧配合、低スランプのものの方が効率が高く、これはコンクリートの粘性に原因があったものと考えられる。

(b) 圧送負荷(主油圧)

図-9.11に実吐出量と主油圧の関係を示すが、これらの間にはほぼ直線的な関係がみられた。今回の実験では主油圧は最大でも90kg/cm²に満たず、ポンプ車の最大作動油圧に対して十分な余裕があるが、これは配管条件の他8インチという大口径の管を用いたことが寄与しているものと考えられる。図-9.12に実吐出量40m³/h時における6種のコンクリートの主油圧を示す。40mm骨材コンクリートでは流動化による圧送負荷の低減効果は貧配合の場合において大きく、ベース配合よりも約20%低減した。60mm骨材コンクリートでの低減効果は40mmの場合よりもやや小さいが15%の主油圧の減少がみられる。スランプが大きくしかも富配合なコンクリートの方が貧配合コンクリートよりも主油圧が大きかったのは、ベーストの水セメント比の差により粘性抵抗が大きかったためと考えられ、貧配合コンクリートにおいても分離に対する抵抗性を高めた配合を選定すれば、圧送負荷をむしろ小さくできることを示唆している。今回の実験で同一セメント量、同一スランプを有する40mmと60mmコンクリートを比較した場合、後者が前者の約1.2倍の負荷となった。

(c) 管内圧力および圧力損失

図-9.13に60mm骨材を用いたベースコンクリートについてオシログラフにより観測した管内圧力の波形を示す。この波形は流動化させた場合や他

のコンクリートの波形と相似であり、また他の測定例に比べて顕著な差は認められなかった。図-9.14に設定吐出量を50ℓ/hとしたときの管内圧力の分布を示す。ベント管を含まないP 1~P 2, P' 3~P 4間の勾配を比較すると前者の方がやや大きい。主油圧からピストン全面圧を求め、P 1における圧力と比較した場合にもP 1の測定値の方がやや大きく、これはP 1位置がベント管直後であり、ベント管周辺の圧力の乱れを若干受けたためと考えられる。ここでは安全側の評価としてP 1~P 2間の圧力損失を求め、実吐出量との関係に整理したものを図-9.15に示す。圧力損失に関して6種類のコンクリートを比較した場合、主油圧と同様の傾向が認められるが、流動化による圧力損失の低減効果は60mm骨材コンクリートの方が40mmの場合よりも大きい結果となった。(吐出量40ℓ/hにおいて、60mmで25%、40mmで15%) 40mm骨材を用いたコンクリートを5インチ管で圧送した実験報告の圧力損失⁽¹⁴⁾と比べると40~60%であり、管径を増すことによる圧送負荷低減効果が非常に大きいことがわかる。ベント管前後のP 3, P' 3間の圧力損失とP 1~P 2間の損失の比から求めたベント管の水平換算長は60mm骨材の場合で約4m、40mm貧配合コンクリートで3.5mであり、文献における3mと比べるとやや大き目の値となった。上記の結果からあるダムでの配管計画に従って求めた水平距離は50ℓ/h圧送時で約140mであり、流動化剤を用いた場合にはさらに50mの延長が可能という結果になった。

以上のように、ひびわれ防止および経済性の観点から、PCD工法では貧配合コンクリートが要求されるが、流動化剤および太径の配管の採用により十分ポンプ圧送が可能であるとの見込みが得られた。

9. 5 結語

本章では、今後さらに適用が予測されるPCD工法によるダム施工について、ひびわれを防止するための施工法のあり方、低発熱セメントとしての3種混合セメントのダムコンクリートの適用性、および流動化剤のポンプ施工性改善効果について、解析および実験より検討を加えた。この結果得られた主要な結論は次の通りである。

- (1) 従来のダムでは、セメント量 $180\text{ kg}/\text{m}^3$ 、リフト高さ 1.5 m 、ブロック長 15 m 程度であれば、ひびわれをほぼ避けることができることが、経験上知られている。本解析を行った結果、このことが妥当であることが確認された。このことから、第5章で述べた方法はダムのひびわれ解析や対策の検討に用いるものであることがわかった。
- (2) PCD工法において、リフト厚さを 1 m とした場合、ひびわれ防止の上からは、セメント量を $200\text{ kg}/\text{m}^3$ 以下とすることが望ましい。 $230\text{ kg}/\text{m}^3$ 程度使用せざるを得ないときは、低発熱性セメントを用いブロック長の制限や練上り温度の低減をはかることが好ましい。
- (3) フライアッシュ混入高炉セメントは、長期強度の伸びが大きく、強度的には問題でなく、低発熱性であること、さらにポンプ圧送改善効果が期待できることから、PCD工法には有用なものと思われる。
- (4) 流動化剤の使用は、貧配合コンクリートにおいても強度や発熱に影響を与えない。しかし、気泡間隔係数を若干増加させ、わずかながら凍結融解抵抗性を減じることがあること、またポンプ圧送による空気量損失のあることから、微細な空気を2%程度多めに連行させるのが良い。
- (5) 流動化剤を添加することにより、ポンプ圧送負荷を貧配合コンクリートにおいても15~20%低減することができる。(2)、(3)を含め、ひびわれ防止と施工性を確保する上で、これらの材料はPCD工法に適しているといえる。
- (6) ポンプ配管を8インチとすることにより、骨材最大寸法が 60 mm 程度である貧配合コンクリートに対して、現有の高能力ポンプ車で圧送が十分可能であることが明らかとなった。

- (7) 吐出量と管内圧力損失や主油圧とは、線型な関係が認められ、PCD工法の施工計画にあたって、ここで得られたこれらの関係は、有効に使用するものと思われた。

【参考文献】

- (1) 国土開発技術研究センター：RCD工法によるダム施工、昭56. 7
- (2) 国土開発技術研究センター：RCD工法技術指針（案）、昭56. 7
- (3) 平賀，倉林：コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp.1-6 日本コンクリート工学協会，1982.9
- (3) 相原，ダム工事ポケットブック、山海堂、昭45. 7
- (4) 福岡：長与ダムのコンクリートポンプ工法について，ダム日本，No.474，pp.1-13，1984
- (5) 山住：PCD工法について（コンクリートポンプによるダムコンクリートの打設），ダム技術，Vol.1-3，pp.16-24，1983
- (6) 住吉他：フライアッシュ混入高炉セメントを用いたコンクリートの性質，セメント技術年報 34. pp.287-290 1980
- (7) 太田：流動化コンクリートの諸性質（特に凍結融解抵抗性）について，コンクリートライブラリー 51 号，pp.93-101，土木学会，昭和58年10月
- (8) 山本，小林：流動化剤の流動化性能および流動化コンクリートの凍結融解抵抗性，土木学会論文集，第348号，V-1，pp71-75，1984.8
- (9) T.C.Powers: Void Spacing as a Basis for Producing Air-Entrained Concrete, Jour of ACI, Vol.50, May, 1954
- (11) 柳田：マスコンクリートにおける温度上昇の実用的推定方法．土木技術資料，Vol.11，No4，pp.3-9，1969.4
- (12) 山根他：コンクリートポンプの圧送負荷の算定，竹中技術研究報告，第19号，pp.36-45 竹中技術研究所，. 1978.4
- (13) 嵩他：高流動コンクリートのポンプ圧送性に関する実験的検討，セメント技術年報 32，1978
- (14) 富所：コンクリートポンプによるダムの施工，建設の機械化，1979. 10
- (15) 全日本コンクリート圧送事業連絡会：特定配合コンクリート圧送実験報告書，昭和54年

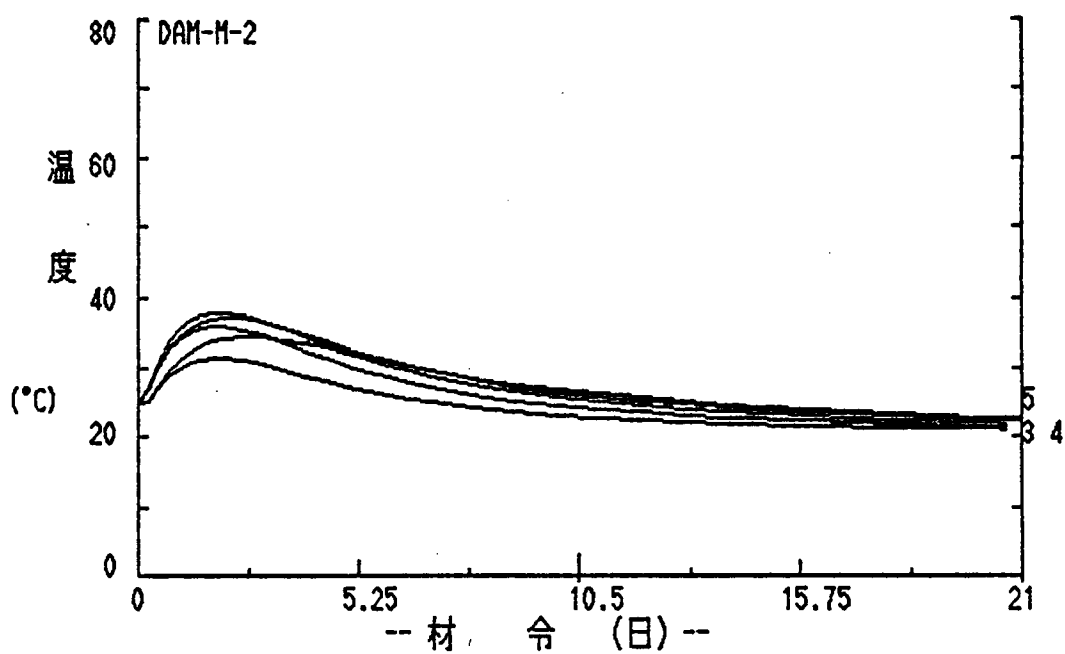


図-9.1 温度解析結果の一例

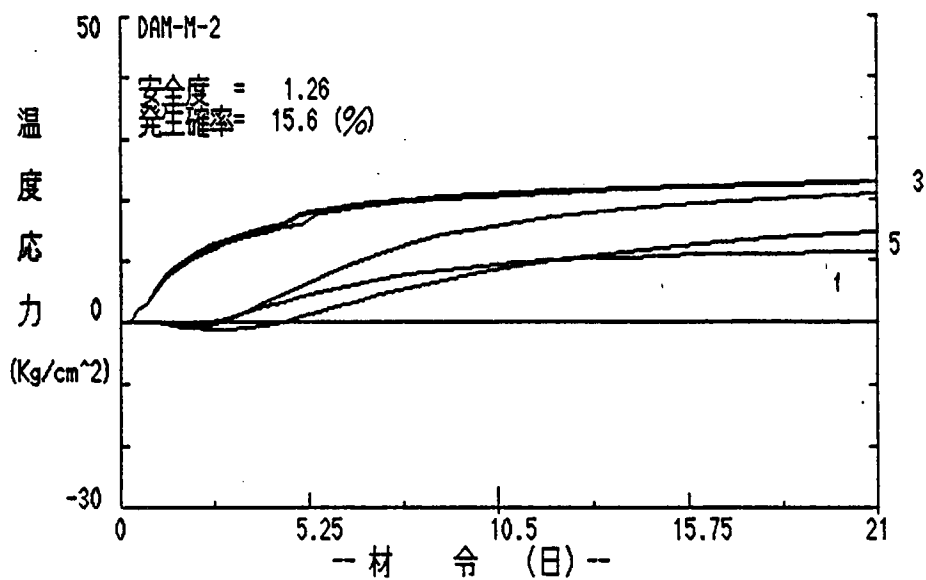


図-9.2 応力解析結果の一例

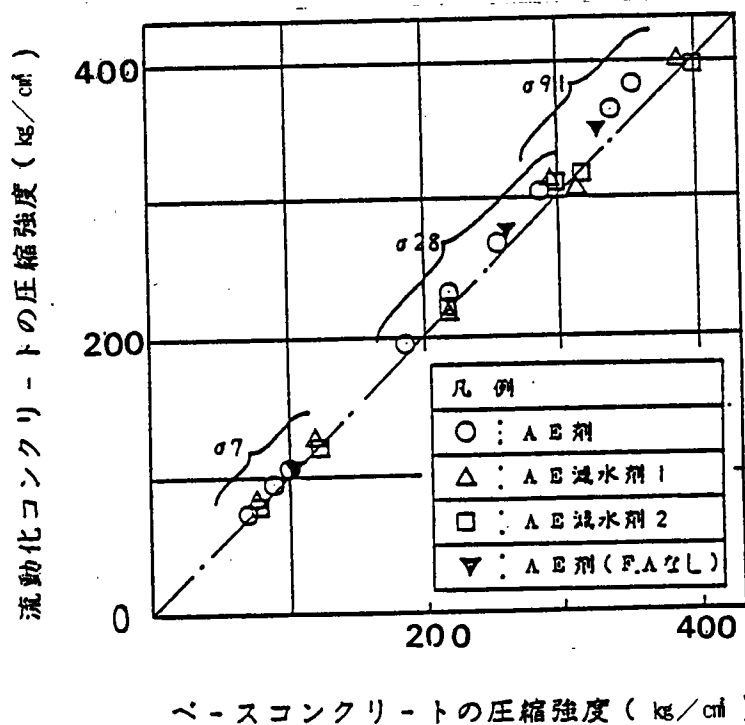


図-9.3 ベースと流動化コンクリートの圧縮強度の比較

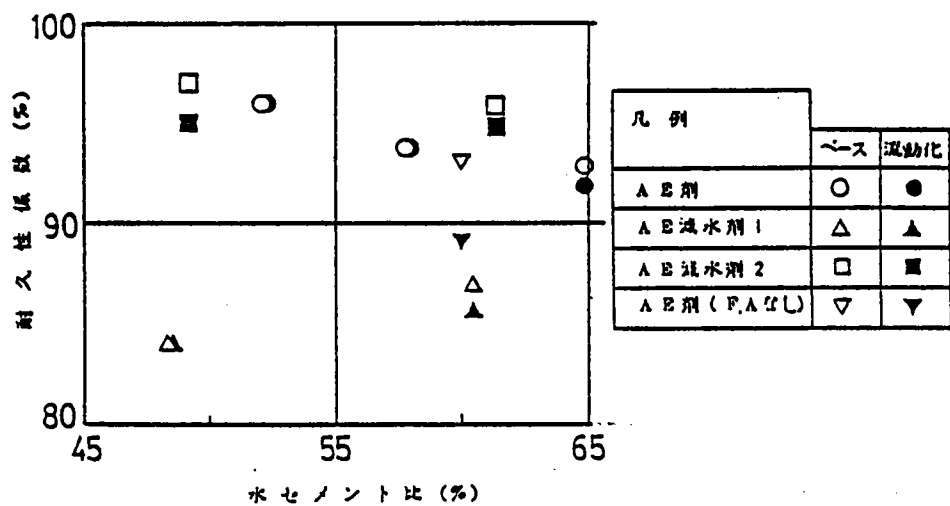


図-9.4 水セメント比と耐久性の関係

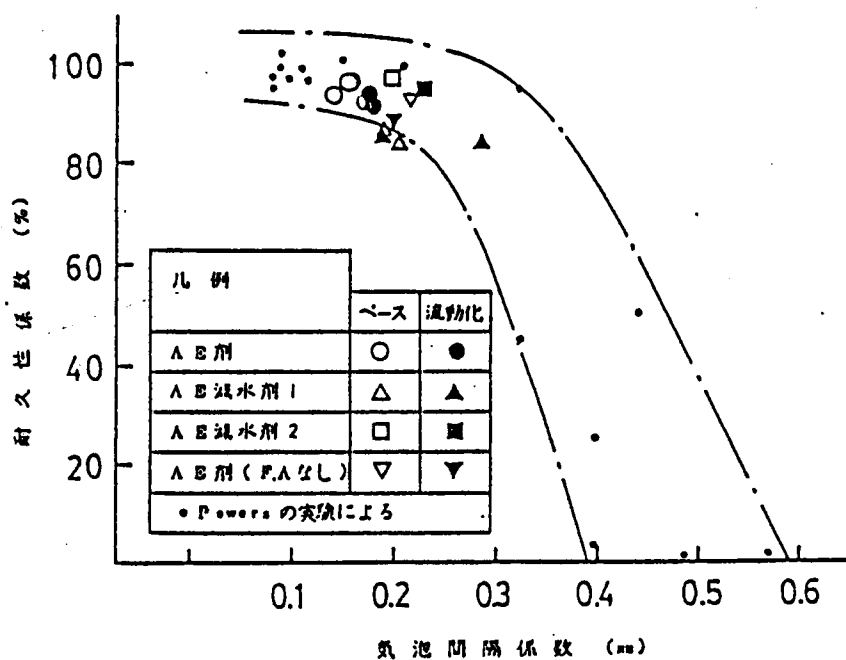


図-9.5 気泡間隔係数と耐久性の関係

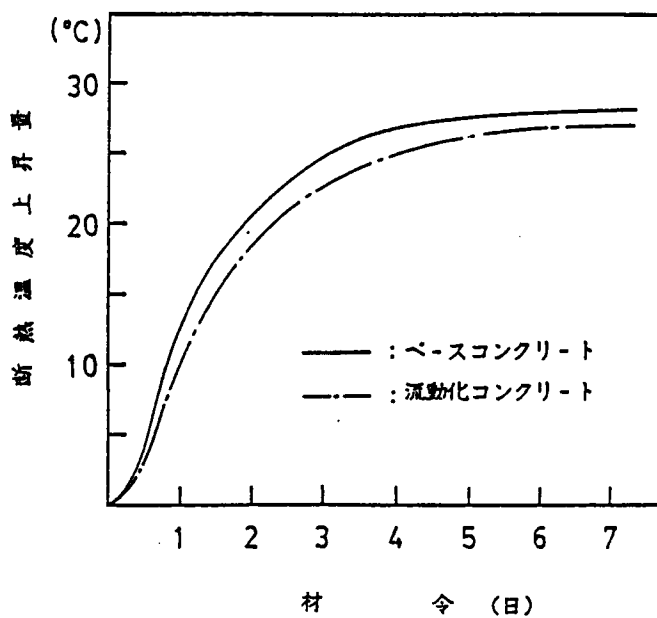


図-9.6 断熱温度上昇試験結果

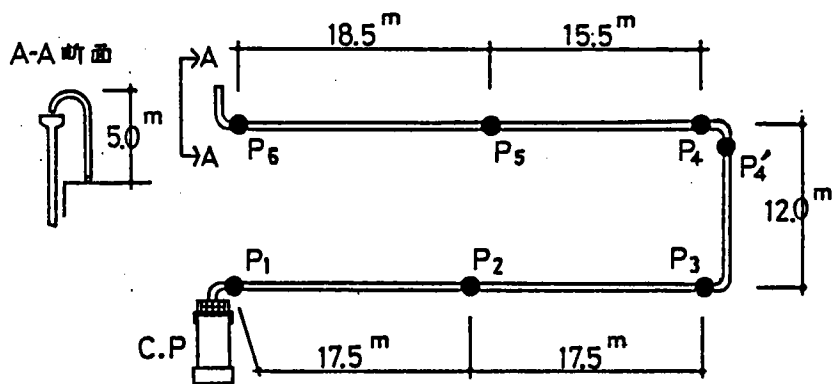


図-9.7 配管および管内圧力測定位置

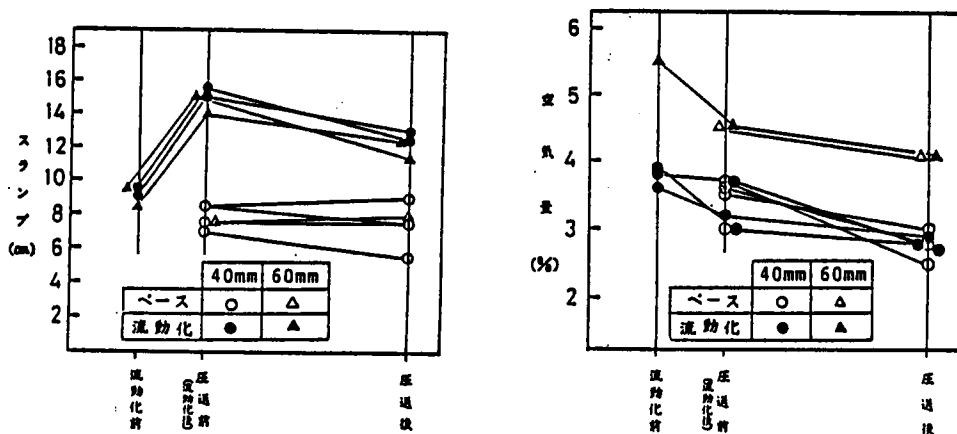


図-9.8 圧送 前後のスランプ，空気量の変化

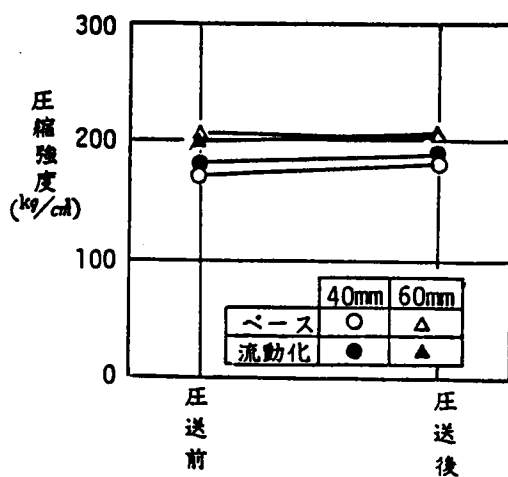


図-9.9 圧送 前後の圧縮強度の変化

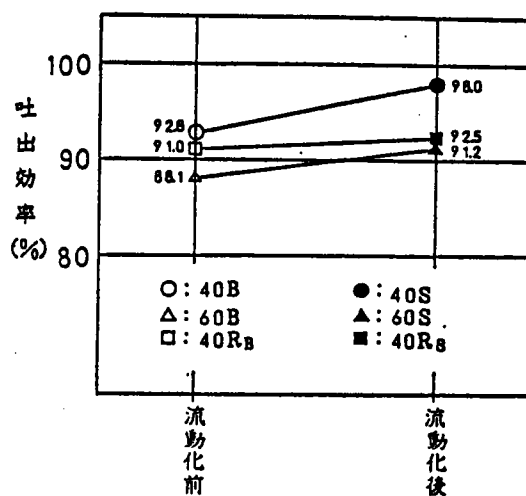


図-9.10 流動化前後の吐出効率

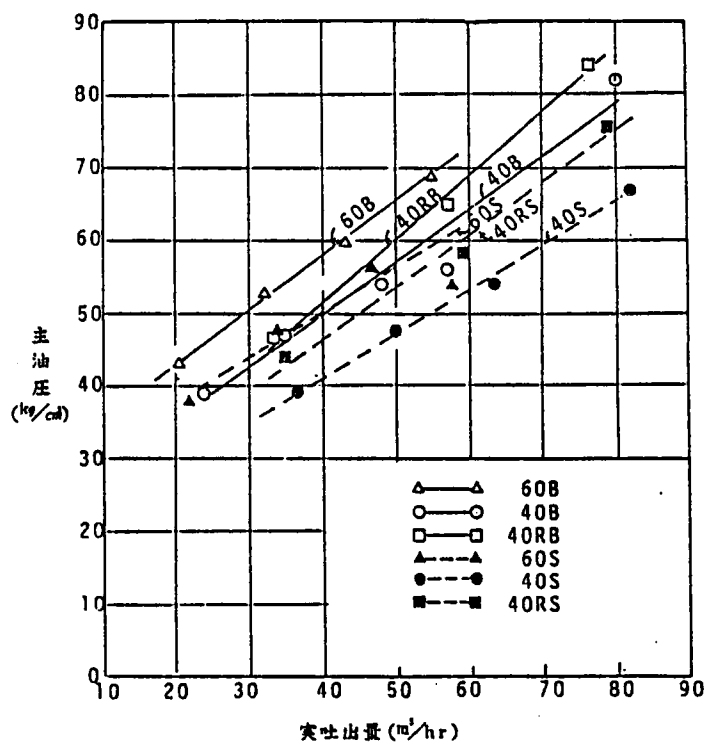


図-9.11 主油圧と実吐出量の関係

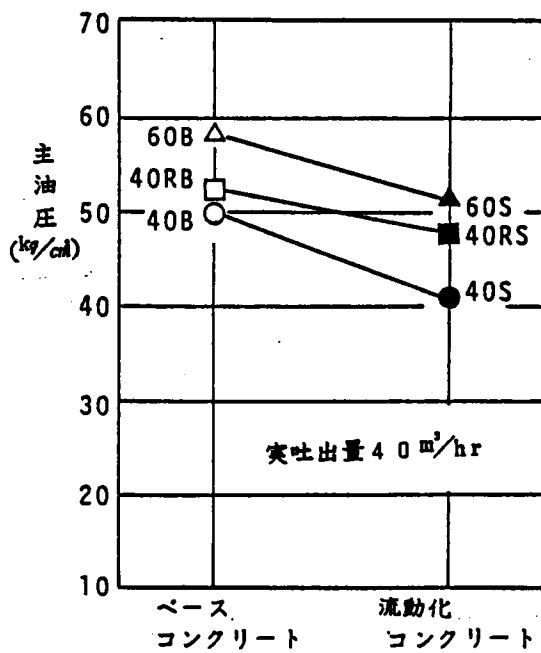


図-9.12 流動化による主油圧の低減効果

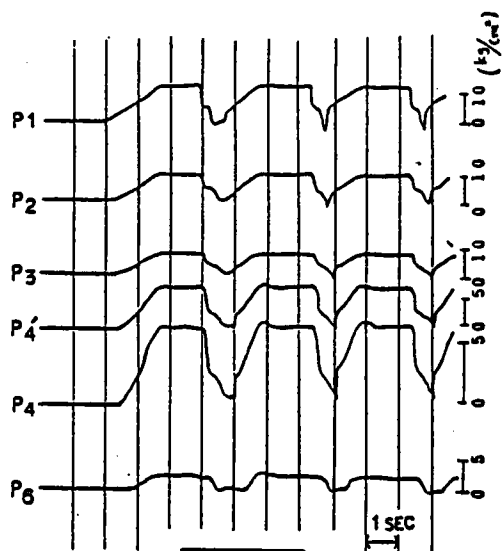


図-9.13 管内圧力波形

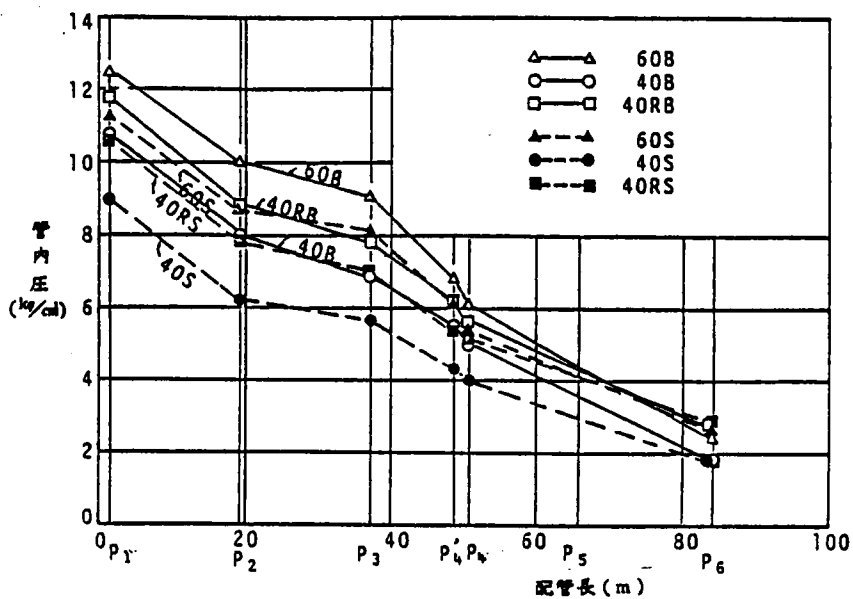


図-9.14 管内圧力分布

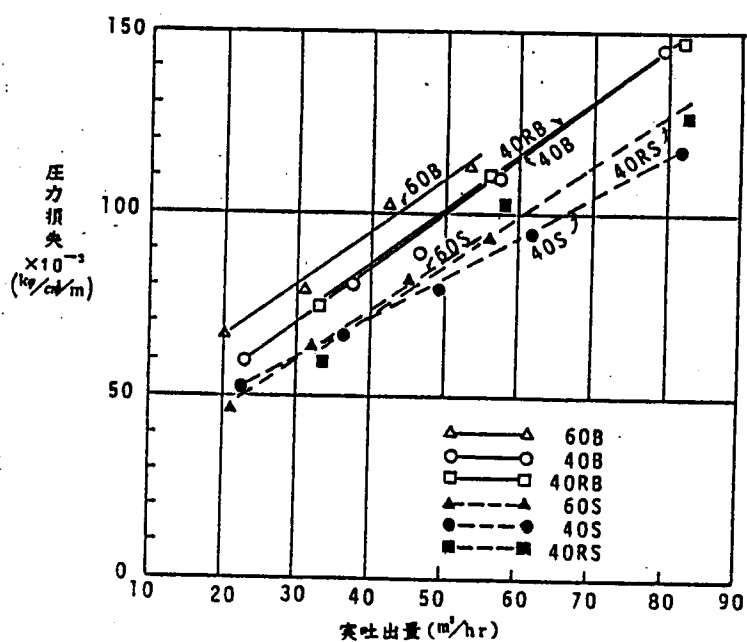


図-9.15 実吐出量と圧力損失の関係

表-9.1 解析ケースの分類

ケース	リフト厚さ (m)	セメント量 (kg/m ²)	材令28日における 拘束度
1	1.0	230	0.75
2	1.0	200	0.75
3	1.0	170	0.75
4	1.5	200	0.75
5	1.0	200	0.65
6	1.0	230	0.65

表-9.2 断熱温度上昇特性

セメント量 (kg/m ²)	K (°C)	α (/day)
170	22.6	0.67
200	24.8	0.70
230	27.0	0.73

$$T = K (1 - e^{-\alpha t})$$

表-9.3 解析結果

応力 (kg/cm²)

ケース	最高温度 (°C)	材令21日 引張強度	材令21日 最大応力	安全率
1	37.9	22.9	20.7	1.11
2	36.4	22.7	18.6	1.22
3	34.9	22.7	16.9	1.34
4	40.6	24.4	25.5	0.96
5	36.4	22.7	16.7	1.34
6	37.9	24.4	18.5	1.29

表-9.4 セメントの物理的性質

セメント	比重	粉末度		凝 結			曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)		
		ブレーン (cm/φ)	88μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)	3日	7日	28日	3日	7日	28日
B 種 高 炉 (三菱)	3.04	3.950	0.8	29.8	3-10	4-55	30	41	71	116	193	415

表-9.5 フライアッシュの試験結果

項 目	物 理 試 験			化 学 試 験	
	比 重	比表面積 (cm ² /g)	単位水量比 (%)	湿 分 (%)	強熱減量 (%)
J I S 規格値	>1.95	>2400	<102	<1.0	<5.0
試 験 成 績	2.31	3.115	—	0.03	1.3

表-9.6 骨材の物理的性質試験結果

種 類	産 地	最大寸法 (mm)	比 重	吸水率 (%)	粗粒率	ふるい通過率 (%)									
						60	40	20	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
細 骨 材	大井川 (川砂)	25	2.62	1.59	2.75	—	—	—	—	100	90	70	44	17	4
粗 骨 材	跡地産石	60	2.67	0.45	7.57	100	82	44	16	1	—	—	—	—	—

表-9.7 コンクリートの配合と試験結果

配合 番号	凝和剤 種別	コンク リ- ート 種別	スラ ブ (cm)	空気 量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						測 定 値					
							C	F	W	S	G	A D	S P	スラブ(㎝) ベ-ース流動化	空気量(%) ベ-ース流動化	コンクリ- ート温度 (°C)		
1	A E 剤	ベ-ース	8	50	65.0	40.0	160	40	130	796	1218	0.180	-	75	54	-	200	
2					57.7	38.8	180	45	130	765	1228	0.225	-	75	54	-	200	
3					52.0	38.0	200	50	130	739	1228	0.275	-	75	54	-	195	
4		65.0	40.0		160	40	130	796	1218	0.180	0.900	85	120	59	52	195		
5		57.7	38.8		180	45	130	765	1228	0.225	1.013	65	120	53	48	200		
6		52.0	38.0		200	50	130	739	1228	0.275	1.125	70	120	51	55	200		
7	A E 剤 減水剤 1	ベ-ース	8	50	60.5	40.0	160	40	121	807	1231	0.500	-	80	-	53	-	195
8					53.8	38.8	180	45	121	773	1242	0.563	-	90	-	59	-	200
9					48.4	38.0	200	50	121	747	1244	0.625	-	80	-	53	-	195
10		60.5	40.0		160	40	121	807	1231	0.500	1.050	75	130	55	54	190		
11		53.8	38.8		180	45	121	773	1242	0.563	1.013	95	140	44	39	185		
12		48.4	38.0		200	50	121	747	1244	0.625	1.125	75	125	53	52	190		
13	A E 剤 減水剤 2	ベ-ース	8	50	61.5	40.0	160	40	123	804	1228	0.400	-	75	-	53	-	190
14					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15					49.2	38.0	200	50	123	747	1239	0.500	-	70	-	53	-	190
16		61.5	40.0		160	40	123	804	1228	0.400	0.900	75	115	53	53	190		
17		-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18		49.2	38.0		200	50	123	747	1239	0.500	1.188	60	125	53	53	190		
19	A E 剤	ベ-ース	8	50	60.0	38.8	225	0	136	768	1220	0.135	-	70	-	56	-	190
20		流動化	12	60.0	38.8	225	0	136	768	1220	0.135	1.013	75	120	56	51	190	

表-9.8 硬化コンクリートの試験結果

記 合 番 号	混 和 剤 種 別	コン グ リ ー ト 値 別	水セメン ト 比 (%)	単位セメ ント量 (kg/m ³)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)			凍結融解試験			気泡間隔係数試験	
					7日	28日	91日	耐久性 係数	凍結率 (%)	融解率 (%)	空気量 (%)	気泡間隔 係数
1			65.0	200	71(38)	167(100)	286(153)	93	97	4.7	0.172	
2		ベ-ス	57.7	225	89(41)	218(100)	338(155)	94	98	5.2	0.143	
3	AE剤		52.0	250	100(39)	254(100)	354(139)	96	98	4.5	0.161	
4			65.0	200	74(38)	195(100)	304(156)	92	97	4.6	0.180	
5		流動化	57.7	225	95(41)	232(100)	363(156)	94	98	4.5	0.172	
6			52.0	250	107(40)	267(100)	383(143)	96	99	5.4	0.160	
7			60.5	200	77(35)	218(100)	312(143)	87	97	5.0	0.192	
8	AE 減水剤 1	ベ-ス	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9			48.4	250	119(40)	294(100)	386(131)	84	98	4.2	0.206	
10		流動化	60.5	200	85(39)	218(100)	308(141)	86	97	5.5	0.190	
11			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12			48.4	250	129(41)	314(100)	401(128)	84	98	3.8	0.287	
13			61.5	200	79(36)	219(100)	315(144)	96	98	4.7	0.159	
14	AE 減水剤 2	ベ-ス	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15			49.2	250	121(41)	298(100)	392(132)	97	98	4.3	0.199	
16		流動化	61.5	200	78(35)	221(100)	317(143)	95	97	5.6	0.171	
17			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18			49.2	250	120(39)	311(100)	398(128)	95	98	4.8	0.229	
19	AE剤	ベ-ス	60.0	225	102(39)	261(100)	327(125)	93	98	5.1	0.217	
20		流動化	60.0	225	106(38)	276(100)	350(127)	89	98	3.9	0.204	

表-9.9 セメントの物理的性質

セメント	比重	粉末度		凝 結			曲げ強さ(kg/cm^2)			圧縮強さ(kg/cm^2)		
		ブレン	88 μ 篩	水量	始凝	終凝	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
		(%)	分(%)	(%)	(時分)	(時分)						
B種フライアッシュセメント(三友)	2.96	3190	1.0	27.5	2.54	4:48	32	44	68	125	201	361

表-9.10 骨材の物理的性質

種類	産地名	最大寸法(mm)	比 重		吸水率(%)	実積率(%)	粗粒率
			絶乾	表乾			
細骨材	玄海海砂(70%)	2.5	2.54	2.56	0.82	64.8	3.24
	宗像砂丘砂(30%)		2.57	2.60	1.02	55.0	1.60
粗骨材	久山産碎石	60	2.94	2.96	0.75	65.2	7.80
	(角閃岩)	40	2.94	2.96	0.78	61.6	7.28

表-9.11 実験に使用した配合

記 号	空気量(%)	スランフ(cm)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単 位 量 (kg/m^3)					流動化剤(Cx%)
					C	W	S	G	AD	
40-B	4.0	8	68.7	43.0	230	158	799	1,222	0.104(AE剤)	—
40-S	"	15	"	"	"	"	"	"	"	0.45
60-B	4.5	8	62.6	38.5	230	144	727	1,347	0.138	—
60-S	"	15	"	"	"	"	"	"	"	0.45
40-RB	4.0	12	54.0	40.0	295	159	756	1,264	0.738(AE剤)	—
40-RS	"	18	"	"	"	"	"	"	"	0.4

本論文は、いまだ減少するには到っていないコンクリート構造物のひびわれのうち、施工に主として関連するマスコンクリートのひびわれの問題をとりあげ、この解決のために行ったいくつかの基礎的な研究をとりまとめたものである。

本章では、この一連の研究で得られた結果を総括して結論とすると共に、今後に残された課題をも併せて述べることにする。

本論文では、まず、第1章に本研究の現在の状況下での位置づけや意義および目的を明らかにした。特に、ひびわれの減少のためには、対策の立案に役立つ、容易で、しかも応力発生メカニズムに沿ったひびわれ予測システムと呼べるものの確立が急務であることを強調した。

第2章では、本論文に関連する既往の研究を紹介すると共に、研究されるべき課題を明らかにすることを試みた。この章では、拘束度、ヤング係数、クリープ、数値計算法などの応力算定に関する事項、ひびわれの発生条件に関連する項、および対策に関する項の主として3項に分けて論じた。

第3章では、応力発生の主原因である外的な拘束度の問題をとりあげ、今まで不明確であった打設ブロックの形状の影響を明確にするための研究を行った。解析は有限要素法で行ったが、特に拘束体の下部、側面の境界条件の影響が無視できる程度に十分大きくした。

まず、打設ブロックと拘束体のヤング係数比と、拘束度の関係を検討した結果逆比例の関係にあることが確認できた。このことは、第5章でのマスコンクリートの拘束系のモデル化のヒントともなり、応力解析上、重要な意味をもつものである。

拘束体が半無限地盤である場合、これが拘束に寄与する有効面積を、種々のブロック形状について求めた。ブロック下の周辺に生じる応力球根の応力密度は、ブロック形状によって異なり、これと共に有効面積も変化する。ブロックの長さ l と高さの比 (l/h) が極く小さい場合を除けば、有効面積は l/h と線型な関係にあることを見出した。

このことは、マスコンクリートの拘束度を l/h と無関係に定めているACI式を始めとする算定式に異論を唱えるものであるとともに、対策の一つである打設ブロックの制限を明確に位置づけることにつながることを示すものである。

同様の解析を、ダムやベースマット、壁体などでみられる、拘束体と打設ブロックが同幅で積層打設される場合についても行った。この結果、半無限地盤と同じ傾向を認めた他、応力球根の深さは打設ブロックの長さの約 $1/3$ であること、

半無限体の場合に比べて拘束有効面積は、ほぼ半減することなどを明らかにできた。以上の結果を利用して、拘束度を、ヤング係数比と l/h の関数とする算定式を提案した。

これらの解析では、界面の付着は完全であるとして行ったものであるが、界面でのすべりや付着特性は拘束度に大きな影響を与えることは容易に予想され、この実験的な説明は今後に残された大きな課題の一つである。また、実際の拘束系は2次元の場合は存在せず、いずれのマスコンクリートにおいても3次元であると思われる。

本研究の一部で行ったように、拘束度は3次元で大きくなることは明白であり、この事を定量的に今後明らかにすることも重要な課題である。

第4章では、マスコンクリートの応力解析に必要な物性値を把握するために実験的研究を行ったものである。このため、マスコンクリート部材に相当する試験体を製作し、これからコアを採取して強度、ヤング係数を求めた。部材内では、水和熱による温度上昇のために硬化が促進され、特に冬期や初期材令では試験室での通常の養生条件で得られる物性値とは異なった値を示すことが観測された。この硬化促進の影響は、寒中コンクリートの強度推定で使用される積算温度の概念を導入することによって整理することができ、強度は積算温度の対数値と直線関係にあること、ヤング係数は強度の平方根と直線関係にあることを認めた。また、試験室で水分の逸散を防止した養生を行えば、小型供試体からこの関係を推定できることも明らかにした。

この他、部材の打ち上り面近傍ではブリージングの影響により他の部分よりも小さい強度となること、冬期と夏期では初期温度の差により強度発現特性が異なることなどを明らかにできた。

後半には、マスコンクリートにおけるクリープの問題を採りあげ、水分逸散のない状態で初期載荷を行い、その特性を検討した。この結果、まず、このような初期材令でのクリープには水分の放散がなくても水和による自由水の減少により、自己収縮が生じ、この影響を加味しなければならないことが分かった。

載荷日数の対数値と単位クリープの間には初期材令から直線関係が認められるが、初期材令載荷でのクリープは大きく、これを加味する必要のあることが分り、これらの関係を示す近似式を与えた。CEB-FIP式などと実験値は、セメントの強度発現特性を考慮すればよく一致し、マスコンクリートのクリープを含む応力解析に有効に利用できることが分かった。

第5章は、本論文の主題になる応力解析方法の提案について述べたものである。3章で得られた結果をもとに、マスコンクリートの拘束系は、マスコンクリート部と弾性的な性質を有する拘束バネからなるモデルで表されることに着眼し、解析方法を提案したものである。マスコンクリート部を要素分割することにより、内、外拘束を受ける場合の他、積層打設にも拡張できることをも示した。

また、マスコンクリート部は材令や温度履歴によって物性値が変化するが、このことをも含めた解析が可能であるようにした。解析方法としては、逐次計算による近似解法と、これを利用した精算法を示した。

この解析法をもとに、温度計算やひびわれ発生限界条件を用いることにより、種々の対策と結び付けたひびわれ予測システムを構成し、マスコンクリートの一つの計算、対策評価方法を提案した。

この方法により、従来の略算法では不明確であったマスコンクリート特有の特性値の取扱いが明確にされるとともに、有限要素法に比べて計算も容易となり、パソコンを利用すれば作業所レベルでも解析が可能となるものである。

第6章では、マスコンクリートの応力進展メカニズムを把握するために、室内でも可能な拘束実験装置を考案し、これを用いて種々の検討を加えた。拘束実験装置は、断熱材で囲まれたコンクリート部と型鋼を用いた拘束部より構成した。また、内部拘束応力に対しては、この外部拘束装置の他に有効応力計を用いることを考えた。

この実験により、外部拘束に対しては、計算上無視できない比較的大きな圧縮応力が作用した後、温度降下に伴い引張応力が作用すること、内部拘束に対しては、初期に表面部で引張応力が作用するが、温度降下に伴い、中心部でも引張応力が働くことなどの基本的なメカニズムを明らかにすることができた。

また、実験値と第5章に示した方法による解析値を比較して、よい一致を示すことを明らかにし、計算法の妥当性を立証した。

本章でも、材料特性に関する検討を行い、第4章での強度やヤング係数の推定式は、硬化直後から適用できることを明らかにした。試験体のひびわれ発生時期における引張強度と、発生応力の比較から、ひびわれ発生限界条件として引張強度を用いることが分かった。しかし、本実験では短期の小型試験体での結果であり、実構造物では寸法効果、応力の緩速進展、鉄筋、埋設金物、断面急変部などによる応力集中、ブリッジの影響などにより、ひびわれ予測に用いる引張強度は低減する必要があるものと思われ、今後なお検討が必要である。

第7章は、第5章の方法を利用して、今後のひびわれ予測法の進展のために2, 3の検討を加えたものである。まずシミュレーション解析を行い、セメントの種別、セメント量、打ち込み温度などがひびわれ発生に与える影響を定量的に求めることを行った。

この結果、セメント種別によりひびわれ安全率は $\pm 30\%$ 程度変化すること、単位セメント量 10 kg/cm の削減により安全率が 5% 以上向上することなどの結果が得られ、対策立案上の資料を与えた。

クリープ解と弾性解の比較から、クリープにより $60\sim 70\%$ に応力緩和され、温度上昇が大きいほど緩和率も大きくなることを認めた。

また、マスコンクリートであることの特長から、クリープ特性は、ある限定し

た範囲で定めることができることに着眼し、リラクセーション関数を求めた。この関数は載荷時材令、流動に関するクリープ係数および材令を変数とするものである。

これらの応力緩和の考え方を利用すれば、第5章での方法は、より簡素化することが可能であるとともに、既往の各種提案式にも適用することができる。

第7章後半には、確率論によるひびわれ発生予測の導入について検討を行った。種々のひびわれ観測データから、ひびわれ安全度と発生確率の関係を求めた結果両者の間には、部材強度と荷重の確率的関係と同様な傾向を認めることができた。すなわち安全率 1.0 は発生確率が約 50% で、完全にひびわれを避けるためには、安全率を 1.5 以上に設定する必要があることなどが分かった。このような取扱いは従来の決定論では得られなかったものであり、今後のひびわれ制御設計に有効に用いるものと考えている。ただし、現在の所ではデータの蓄積が不足で、今後も検証が必要と思われる。

ひびわれを防止するためには、上記のような計算法の確立と同時に、具体的な防止方法を確立する実際的な研究が必要である。

第8章では、ベースマットと円筒壁よりなる大規模な格納施設を、第9章ではポンプ施工により施工されるダムを対象としてとりあげ、これらのひびわれ防止対策を検討した。

第8章では、防止のための基本材料として中庸熟フライアッシュセメントの採用と、流動化剤によりセメント量低減を考え、まず、このコンクリートの特性を研究した。この結合材による水和熱は、一般の低発熱セメントを下回るものであり、長期強度の大きい特性を生かした管理を行うことにより、マスコンクリート用構造材として適当なものであることを立証した。

ベースマットの積層打設の検討から、第5章の方法は、コンクリート要素を幾つかに分割し、リフト毎に温度変化を与えることによって、積層打設にも適用できることを明らかにした。また、この結果から、上層のリフトを打設することにより引張応力が増加し、場合によってはこれがひびわれにつながるもの、単層での解析では得られない挙動が生じることができた。

シミュレーション解析から、ブレースリングの効果は大きいこと、円筒部では、上方に打ち上るに従って拘束度は減少するが、ベースマットでの立ち上り部では拘束が大きく、低発熱のコンクリートとすること以外に、ブレースリングやリフト高さ制限をも併用しなければひびわれ防止は基本的に不可能であることを明らかにした。

第9章のPCD工法によるダム施工に対しても、同様に高炉、フライアッシュセメントと流動化剤を用いた低発熱化材料について、まず検討した。

このコンクリートの発熱の小さいことを確認すると共に、ダムで特に重要な凍結融解抵抗性についても検討した。流動化材の使用により気泡間隔係数が増大す

ること、ポンプ圧送を行うことから、空気量を 1-2%多めに設定すれば、耐久性に問題のないこと、強度的にも問題のないことが明らかとなった。

シミュレーション解析から、リフト高さを 1m、セメント量を 200 kg/m³とすればひびわれは避けうるが、これより危険側の施工条件となる場合には、より低発熱のセメントの採用、ブロック長の制限などを配慮する必要があることを指摘した。

このようなマスコンクリートのひびわれをはかったコンクリートを用い、PCD工法として確立するためには、ポンプ圧送性を確認することが不可欠の条件となる。第9章の最後にはこの点を明らかにするために行った圧送実験を採りあげた。

60mの骨材最大寸法を有する貧配合のコンクリートにも流動化剤が有効に作用し、圧送負荷を 10-20%低減できること、圧送による品質変化は大きくないことを確認すると同時に、吐出量と管内圧力損失のポンプ計画上の資料を与えることができた。

PCD工法は、経済性の大きいことから、今後さらに適用が増すものと期待されるが、より低発熱な材料の研究や、さらに貧配合でも圧送が可能なポンプの開発がひびわれ防止からも要請され、今後の大きな研究課題として残されている。

以上のように、本論文は、マスコンクリートにおけるひびわれ防止のための合理的な計算方法の提案と、これに付随する材料特性の解明、ひびわれ防止設計のための諸検討を骨子としたものである。欧米では鉄筋や目地によるひびわれ制御方法が採用されており、今後、日本においてもこの方向の研究が必要とされよう。しかし、このような制御法によるとしても、まず、ひびわれを防止する手段を講じることは、基本的に重要であることには変りないものと考えられる。本論文がこの意味で防止のための一助となれば幸いである。

最後になりましたが、コンクリート工学および研究の基本を御指導、御教示下さり、また、本論文をまとめる機会を与えていただくと共に、終始暖かい御指導と激励を頂きました。京都大学教授、岡田清博士に衷心より感謝の意を表します。

本研究は、著者が、竹中技術研究所にて勤務中に担当した諸研究のうちマスコンクリートに関連する研究をとりまとめたものであり、この研究を行う機会を与えて頂いた遠藤正明常務取締役、近藤基樹取締役研究所長に感謝いたします。

また、鳥取大学 西林新蔵教授、岐阜大学 小柳 治教授、神戸大学 藤井 学教授、京都大学 小林和夫助教授を始めとして、京都大学工学部土木材料学研究室の先輩諸兄から常に励ましのお言葉を頂きました。ここに心から御礼申しあげます。

本研究は、多くの方々との共同研究の成果をとりまとめたものであり、とりわけ、竹中工務店技術研究所、研究員 米沢敏男氏、両角昌公氏には共同研究者として実験、解析に多大の助力をいただきました。竹中土木、丹原利夫氏、中島徹氏、竹中工務店、渡辺眞次氏にも研究所在任中に多くの協力を受けました。

第4章、第8章の研究の一部に、(株)関西電力からの依託研究の貴重な成果を引用させていただき、また、第9章の実施にあたっては、名古屋大学 吉田弥智教授、竹中土木技術本部 鈴木志郎部長、竹本油脂(株)高橋次吉部長、から助言とご協力を頂きました。

本論文は、これらの方々の御理解と御協力なしでは完成し得なかったものであり、ここに深甚なる謝意を表する次第である。